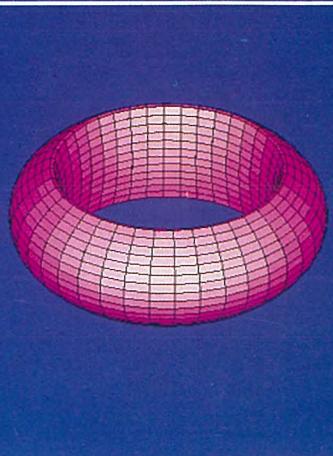
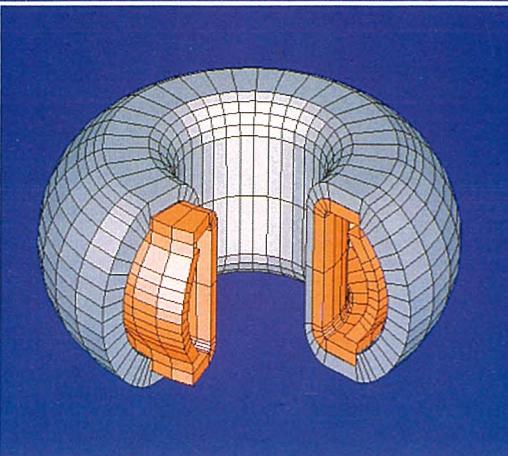
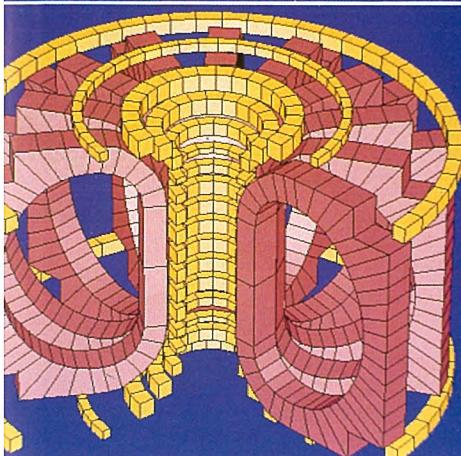
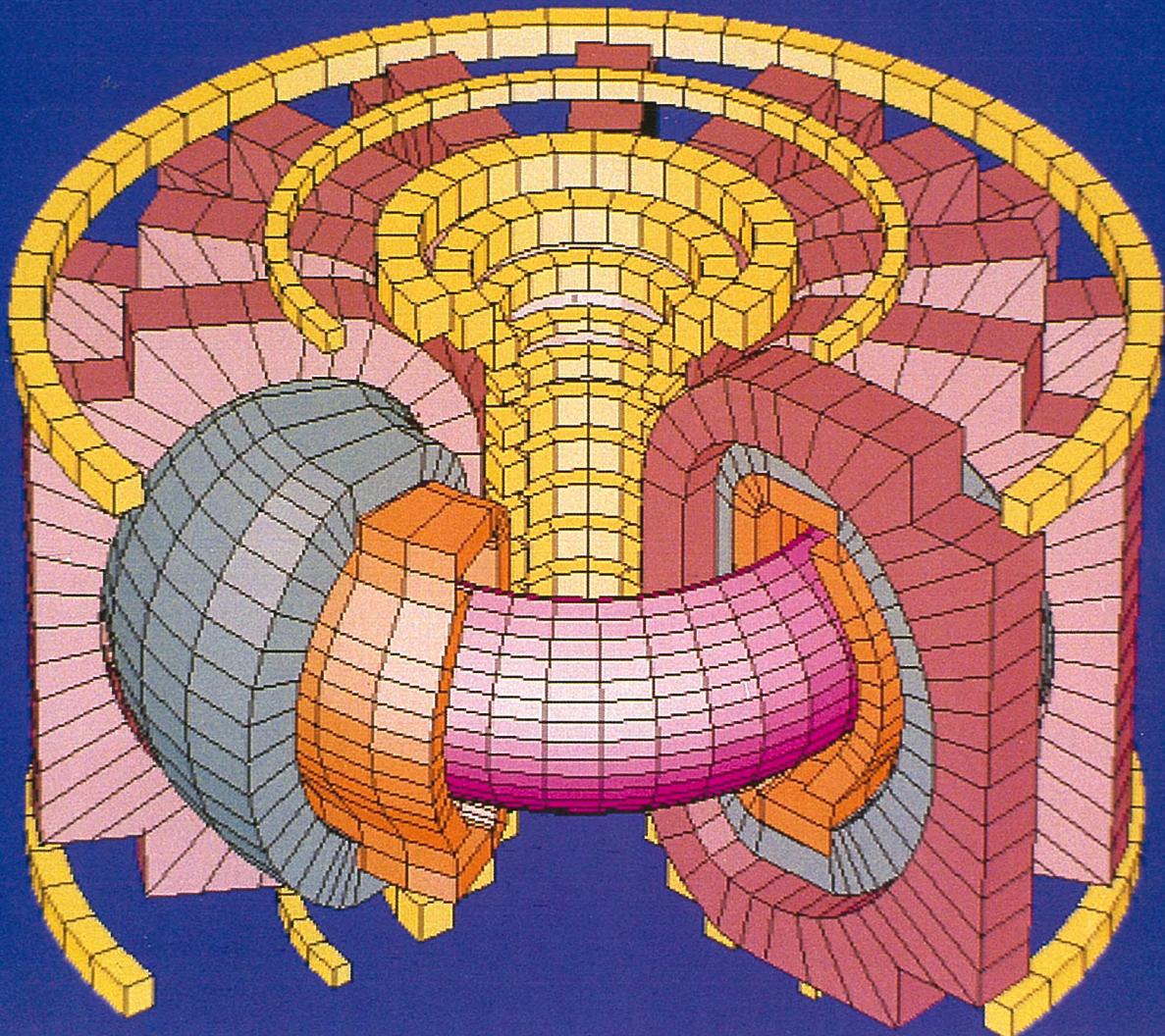


# MITSUBISHI DENKI GIHO

# 三菱電機技報



Vol.58 No.4

核融合特集

## 核融合特集

### 目 次

#### 特 集 論 文

核融合特集号に寄せて	1
閑口 忠	
核融合研究開発の歩みと今後の課題	2
富永正太郎・森川鐵也・浅見直人・郡 正治	
核融合炉の設計研究と技術開発	4
福田晴彦・塙本忠則・今村 豊・富田 充・笠井雅夫・伊尾木公裕	
核融合実験装置	9
太田 広・成川武文・山田政男・内川高志・長田大三郎・久野和雄	
超電導マグネット	15
河村寿三・橋本康男・荻野 修・佐藤 隆・丸山佳宏	
高周波加熱装置	20
上田和宏・塙田 勝・朝井克治・後藤正治・佐藤真一	
核融合試験装置用電源・制御装置	25
林 重雄・山中芳宣・村上輝男・湯浅和典・大藪 熱	
核融合装置の設計・解析プログラムの開発	32
西川正名・亀有昭久・塙本忠則・松岡不識・八十島義行	
実験装置“逆磁場テータピンチ”	38
八十島義行・植田至宏・篠尾博之・上野 昇・田中俊秀	

#### 普 通 論 文

加圧水型軽水炉用超音波流量計	42
池永良知・松本英三・尾崎禎彦・友田利正・小田 稔	
鉄鋼プロセスラインの全交流化駆動システム	47
片山誠一・新野修平・矢野禎成・手塚彰夫・瀬戸 誠	
全自動高速丸鋸鋼管切断機	52
星野吉信・生原春夫・村松英樹・戒田英昭・坂本正行	
三菱広域監視制御装置《MELFLEX》のシリアルIO	57
村田尚生・犀川真一・山根信吾・田中英和	
三菱パーソナルコンピュータ《MULTI 16》モデルII	62
鈴木昭夫・牧野友明・山崎 真	

特許と新案	69, 70
放射線測定装置	
X線発生装置用ターゲット装置	
中性子検出装置	

#### ス ポ ッ ツ ラ イ ト

12GHz直接放送衛星受信システム用超低雑音GaAs FET MGF 1404	41
TV/VTR用v/s, f/sマイコンシリーズ	67
高機能16ビット基板コンピュータPCA8630, PCA8631	68
チルド室付き4ドア冷凍冷蔵庫	(表3)

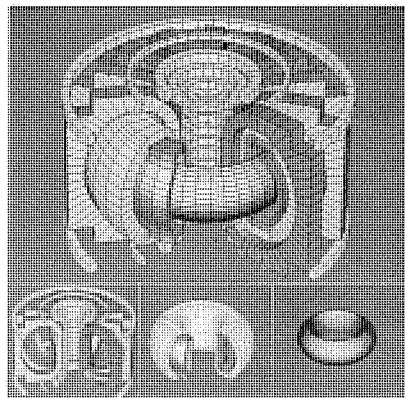
#### 表紙

##### 核融合実験炉の鳥瞰図

核融合装置は、多種の物理現象とコンポーネントから構成されており、高品質でかつ迅速に設計・解析を行うためには高度の電子計算機の利用技術が不可欠である。

写真は現在検討されている核融合実験炉の本体鳥瞰(瞰)図をグラフィックディスプレイ上に作ったものである。この図の作成プログラムは、トカマク装置設計プログラムに接続されており、トカマク装置の各種特性や空間条件などの設計・解析を行った結果についてその本体構造を出力したものである。

ここに示した鳥瞰図の作成プログラムは、デブス・バッファ法及びスムーズ・セーディング法という最新の図形処理法に基づいたものである。



## アブストラクト

### 核融合研究開発の歩みと今後の課題

富永正太郎・森川鐵也・浅見直人・郡 正治  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P2~3

核融合研究開発は近年著しく進展しており、特にトカマク型核融合実験装置においては、臨界プラズマ条件の達成を目前にする段階にある。一方、他の型による研究開発も幅広く進められており、更に、将来エネルギーを取り出す核融合炉の検討も行われている。この間、三菱グループはメーカーの立場から研究開発に参画し、その進展と共に歩んできた。

この特集では、その一端と今後の課題について概説する。

### 高周波加熱装置

上田和宏・塩田 勝・朝井克治・後藤正治・佐藤真一  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P20~24

高周波加熱が核融合プラズマの加熱に重要な役割を果たしている。当社は、このECH、ICRFの分野で国内最大級の装置製作の実績をもっている。これらはいずれも京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに納入し、プラズマの加熱研究に用いられている。

この論文は、この概略の構成と性能を述べたものである。また日本原子力研究所に納入した、ICRF用の新しいランチャ・リッジ導波管結合器についても述べる。

### 核融合炉の設計研究と技術開発

富田晴彦・塚本忠則・今村 豊・富田 充・笠井雅夫・伊尾木公裕  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P4~8

D-T核反応を行う核融合炉を実現するためには、放射性トリチウムの処理、中性子に対する材料、放射化された炉構造の取扱など解決すべき多くの技術課題がある。三菱グループは、D-T核反応を行う日本原子力研究所の核融合実験炉設計、名古屋大学プラズマ研究所のR計画に当初より参加し、全体システムの概念設計を行うと共に必要な技術開発に取り組んできたのでその概要を紹介する。

### 核融合試験装置用電源・制御装置

林 重雄・山中芳宣・村上輝男・湯浅和典・大藪 獅  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P25~31

核融合試験装置用電源は、短時間に直流大電力を供給し、かつ高精度、速応答制御が要求される。電力系統に対する変動負荷の平滑化のためフライホイール発電機が、高速制御のためにはサイリスタ変換器が適用されている。制御系は多様な運転モードに対応できるようデジタル方式を採用するとともに、試験装置自身が発生するサーボ、ノイズに対し種々の対策がとられている。

### 核融合実験装置

太田 広・成川武文・山田政男・内川高志・長田大三郎・久野和雄  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P9~14

近年、我が国で核融合の実現を目指した核融合実験装置が相次ぎ建設されている。これまでに製作し納入した核融合実験装置のうち、日本原子力研究所納め高性能トカマク開発試験装置 (JFT-2 M)、京都大学納めヘリオトロンDR、名古屋大学プラズマ研究所納め逆転磁場型軸対称環状装置 (STP-3 M)、同SPAC IV-DRプラズマ実験装置などの概要と、それを製作するため新しく開発した製造技術のいくつかを紹介する。

### 核融合装置の設計・解析プログラムの開発

西川正名・亀有昭久・塚本忠則・松岡不識・八十島義行  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P32~37

核融合装置は多種類の物理現象とコンポーネントから構成されており、また開発途上技術であるため、その設計に電子計算は不可欠である。三菱核融合開発室では、あらゆる核融合装置を高品質かつ迅速に設計できるよう電子計算プログラムシステムを開発してきたが、本稿では核融合装置での電子計算の特質について概説するとともに、三菱核融合開発室の設計・解析プログラムシステムについてその概要を紹介する。

### 超電導マグネット

河村寿三・橋本康男・荻野 修・佐藤 隆・丸山佳宏  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P15~19

核融合の磁気閉じ込め技術において、超電導は必須技術である。トロイダル用のNb<sub>3</sub>Snによる高磁界超電導線材、ポロイダル用のパルス超電導線材及び非導電性FRPデュワのより高性能化を求めての開発が不斷に続いている。またそれらコイルに加わる電磁力も大きく、液体ヘリウム温度レベルでのヘリウム冷凍技術への、システム的なものも含めた課題は厳しいものがある。

この論文ではこれらの課題の概観を当社最近の成果も交えて論じた。

### 実験装置“逆磁場データピンチ”

八十島義行・植田至宏・笛尾博之・上野 昇・田中俊秀  
三菱電機技報 Vol.58・No.4・P38~40

核融合技術の基礎であるプラズマ計測・制御の研究のために、当社中央研究所に逆磁場データピンチ装置を設置し、プラズマ実験を開始した。この装置は直線形であるが、安定なトーラス状の高温・高密度プラズマを発生できる。

この論文では、プラズマ装置本体の構成、真空排気系、電源系、制御・計測系の概要について述べる。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 20-24 (1984)

## Radio-Frequency Devices for Plasma Heating

by Kazuhiro Ueda, Masaru Shiota, Katsuji Asai, Masaharu Goto & Shin'ichi Sato

Radio-frequency heating technology is playing an important role in plasma-heating systems. Mitsubishi Electric has produced the largest equipment for electron cyclotron heating (ECH) and ion cyclotron range of frequency (ICRF). Both of these devices were delivered to the Plasma Physics Laboratory of Kyoto University for use in plasma-heating research.

The article outlines the structure and performance of these devices and also touches on a new rancher for a ridged waveguide connector for ICRF applications.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 25-31 (1984)

## A Power-Supply and Control System for Fusion Reactors

by Shigeo Hayashi, Yoshinobu Yamanaka, Teruo Murakami, Kazunori Yuasa & Isao Oyabu

Fusion reactors require power-supply systems capable of supplying large DC currents over short periods of time with rapid response and high accuracy. Flywheel generators are employed to minimize the effects of fluctuating loads on the power system and thyristor converters are used for high-speed, accurate control. A digital control system enables the power-supply system to cope with a diverse range of reactor-operating modes, while countermeasures have been taken to deal with surge and noise generated in the fusion reactor itself.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 32-37 (1984)

## The Development of Design and Analysis Program Systems for Nuclear-Fusion Facilities

by Masana Nishikawa, Akihisa Kameari, Tadanori Tsukamoto, Fushiki Matsuoka & Yoshiyuki Yasojima

Nuclear-fusion facilities embrace a wide variety of components and physical phenomena, and as facility design is still under development, the use of computerized design and analysis are essential. The Mitsubishi Fusion Center has developed a computer-program system capable of designing all types of fusion facilities with a high standard of quality while reducing design time to a minimum. The article discusses the special considerations involved in computerized design and introduces the Mitsubishi Fusion Center's design and analysis program.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 38-40 (1984)

## A Reversed-Field Theta-Pinch Plasma Machine

by Yoshiyuki Yasojima, Yoshihiro Ueda, Hiroyuki Sasao, Noboru Ueno & Yoshihide Tanaka

Mitsubishi Electric has constructed a reversed-field theta-pinch machine at its Central Research Laboratory and initiated a series of plasma diagnostics and control studies for development of nuclear-fusion technology. Although the device has a linear configuration, a stable high-temperature, high-density toroidal plasma can be generated.

The article describes the overall structure, vacuum system, power-supply system, and diagnostics and control system of the plasma machine.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 2-3 (1984)

## The Status of Nuclear-Fusion Technology

by Shotaro Tominaga, Tetsuya Morikawa, Naoto Asami & Masaharu Kori

Nuclear-fusion research and development have made remarkable progress in recent years. With the aid of Tokamak fusion-testing devices, test plasmas are close to reaching the so-called "energy-break-even point."

Research and development on other types of fusion equipment are also advancing rapidly, and nuclear-fusion reactors for producing energy in specialized forms are also under study. As a major manufacturer of nuclear-fusion equipment, the Mitsubishi Group has participated in R&D planning for advanced fusion equipment, and progress in the forefront of technological development.

This special issue on nuclear fusion summarizes a part of the way we have come and foresees future possibilities.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 4-8 (1984)

## Design Studies and R&D for Nuclear-Fusion Reactors

by Haruhiko Tomita, Tadanori Tsukamoto, Yutaka Imamura, Mitsuru Tomita, Masao Kasai & Kimihiko Ioki

Before a D-T reacting-plasma experiment can be performed, a number of technological hurdles remain to be surmounted, among them the development of tritium-handling technologies, neutron-resistant materials, and procedures for handling the reactor structure after it becomes radioactive. The Mitsubishi Group has been involved in overall systems design and technology development for two major projects in this field since their outset: 1) a fusion experimental reactor (FER) design study commissioned by the Japan Atomic Energy Research Institute, and 2) a reacting-plasma project (R-Project) under the Nagoya University Institute of Plasma Physics. The article introduces these two projects and summarizes their main technical features.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 9-14 (1984)

## Nuclear-Fusion Experimental Apparatus

by Hiroshi Ota, Takefumi Narikawa, Masao Yamada, Daisaburo Nagata, Kazuo Kuno & Takashi Uchikawa

In recent years, Japan has been constructing a succession of nuclear-fusion experimental apparatuses as part of a plan to develop nuclear fusion as a practical source of electric power. The article introduces several completed and delivered apparatuses, including the JFT-2M high-performance research Tokamak produced for the Japan Atomic Energy Research Institute, Kyoto University's Heliotron DR, and the STP-3M reverse-field pinch device and an SPA-IV-DR plasma experimental apparatus built for the Nagoya University Institute of Plasma Physics. The article also discusses newly developed production technologies.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 58, No. 4, pp. 15-19 (1984)

## Superconducting-Magnet Technology

by Toshimi Kawamura, Yasuo Hashimoto, Osamu Ogino, Takashi Satow & Yoshihiro Maruyama

Superconductivity technology is essential to achieve magnetic confinement for nuclear fusion. Development work to raise the performance of superconductor components has been proceeding smoothly in the areas of niobium-tin (Nb<sub>3</sub>Sn) high-field superconductors for toroidal field coils, pulsed superconductors for poloidal field coils, and a nonconductive FRP dewar for superconductor cooling. System considerations involving the large electromagnetic fields of the coils, and the refrigeration technology required to maintain liquid-He temperatures remain as major hurdles. The article discusses these areas and summarizes recent Mitsubishi Electric advances.

## アブストラクト

### 加圧水型軽水炉用超音波流量計

池永良知・松本英三・尾崎禎彦・友田利正・小田 稔

三菱電機技報 Vol.58-No.4-P42~46

PWR給水系統主配管内の高温高圧水流量を測定するための超音波流量計を開発した。従来方式とは異なり、上流下流への超音波伝播時間差を直接測定している。超音波素子は、比較的長い伝音棒の採用により高温配管から遠ざけ、常温用の変換効率の高いPZTタイプを使用している。音速の水温依存性を補償するための新方式を開発し、優れた出力直線性を達成した。安定性にも優れ、フィールド試験の結果、PWRでの実用性が検証できた。

### 三菱広域監視制御装置《MELFLEX》のシリアルIO

村田尚生・犀川真一・山根信吾・田中英和

三菱電機技報 Vol.58-No.4-P57~61

三菱広域監視制御装置《MELFLEX》用シリアルIOは、データ処理部～IO間を距離制限が少なく線数の少ないシリアルラインで延長し、IOをプロセス・マンマシン至近に設置可能とするものでありケーブル量の減少をねらいとする。この目的に沿い、更に小形化・高信頼度化・低電力化を実現するために、LSI開発、実装方式刷新、RAS向上を図った。

### 鉄鋼プロセスラインの全交流化駆動システム

片山誠一・新野修平・矢野禎成・手塚彰夫・瀬戸 誠

三菱電機技報 Vol.58-No.4-P47~51

誘導電動機の速応制御の技術が確立し、プロセスライン駆動用モータにメンテナンスフリーの誘導電動機を適用できるようになった。ここでは、中小容量領域には直流配電式トランジスタインバータを、これを越える大容量領域には電流形サイリスティンバータを適用したプロセスライン用交流化駆動システムを標準系列化したので、その概要及び特性について紹介するとともに、工場組合せ試験を行ったので、その結果についても述べる。

### 三菱パーソナルコンピュータ《MULTI 16》モデルII

鈴木昭夫・牧野友明・山崎 真

三菱電機技報 Vol.58-No.4-P62~66

日本最初の16ビットパーソナルコンピュータ《MULTI 16》の上位機として《MULTI 16》モデルIIを商品化した。

《MULTI 16》モデルIIは、マイクロプロセッサi8086高速版を使用して大幅に処理性能を向上させるとともに、マルチタスクOS（コンカレントCP/M）の使用も可能とした。日本語処理機能及び端末機能も一層充実し、多機能パーソナルコンピュータとして幅広い利用を期待している。

### 全自动高速丸鋸鋼管切断機

星野吉信・生原春夫・村松英樹・戸田英昭・坂本正行

三菱電機技報 Vol.58-No.4-P52~56

三菱電機(株)は、住友商事(株)が西独TREMAG社から钢管切断機の技術導入を行ったのを機に、住友商事(株)から製造委託をうけ、既にオーストリアVÖEST社で稼働実績のあるTREMAG社のVRU-16形切断機をモデルとし、自動制御システムを採用した、日本の製鉄会社の要求にマッチする、改良形を製作した。

本稿では、この钢管切断機の概要と切断試験結果について紹介する。

# Abstracts

**Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 58, No. 4, pp. 57~61 (1984)**

## An I/O Unit Connected with a Serial Bus for Use with MELFLEX Remote Supervisory-Control Systems

by Hisao Murata, Shin'ichi Saikawa, Shingo Yamane & Hidekazu Tanaka

This unit extends the distance between a data processor and the unit by the use of a serial bus, which offers the advantages of longer cable lengths and fewer serial lines. This allows I/O units to be placed closer to processing and man-machine sites with a minimum of cabling. In designing a unit to achieve these objectives, specially developed LSIs were employed in a redesigned layout to achieve miniaturization, low power dissipation, and higher reliability, marking an important advance in Mitsubishi Electric's RAS (reliability, availability, and serviceability) system.

**Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 58, No. 4, pp. 62~66 (1984)**

## The MULTI 16 Model II Personal Computer

by Akio Suzuki, Tomoaki Makino & Makoto Yamasaki

The MULTI 16, Japan's first 16-bit personal computer, has been upgraded and marketed as the MULTI 16 Model II.

The Model II employs the i8086 high-speed microprocessor, greatly raising performance and permitting use of the Concurrent CP/M multitask operating system. An expanded array of Japanese-language processing and terminal I/O functions makes the Model II a versatile machine promising a wide range of application.

**Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 58, No. 4, pp. 42~46 (1984)**

## The Development of an Ultrasonic Flowmeter for PWRs

by Yoshihiko Ikenaga, Hidezo Matsumoto, Yoshihiko Ozaki, Toshimasa Tomoda & Minoru Oda

An ultrasonic flowmeter has been developed for monitoring the flow of high-temperature, high-pressure water in the supply pipes of pressurized-water reactors (PWRs). The revolutionary detection method works by measuring the difference in speed of an ultrasonic signal traveling upstream and downstream in the water flow. By using a relatively long ultrasonic waveguide, it is possible to separate the ultrasonic elements from the high-temperature pipes, permitting the use of a low-temperature PZT element to achieve a higher conversion efficiency. In addition, a new method has been developed to compensate for changes in the speed of sound due to temperature fluctuations, resulting in excellent output linearity. The stability of the new flowmeter is also extremely high, and field testing has demonstrated its usefulness for PWRs.

**Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 58, No. 4, pp. 47~51 (1984)**

## An AC Drive System for Metal-Processing Lines

by Seichi Katayama, Shuhei Niino, Sadanari Yano, Akio Tezuka & Makoto Seto

The development of rapid-response control technology for inductive motors now permits maintenance-free inductive motors to be employed for driving AC processing lines. Mitsubishi Electric has used this technology to produce a standardized line of AC drive systems for processing-line applications. The new systems employ transistor inverters driven from a common DC line for low- and medium-power requirements, while current-fed thyristor inverters meet larger power requirements. The article introduces the configuration and characteristics of the new systems and reports on the results of factory assembly testing.

**Mitsubishi Denki Gihō: Vol. 58, No. 4, pp. 52~56 (1984)**

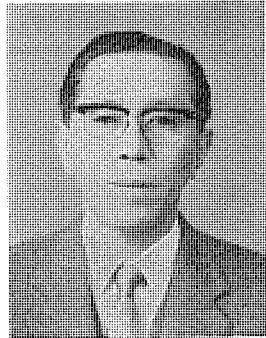
## An Automatic High-Speed Vertical Cold Circular Saw for Steel Pipe

by Yoshinobu Hoshino, Haruo Haibara, Hideki Muramatsu, Hideaki Kaida & Masayuki Sakamoto

When Sumitomo Corporation recently introduced steel-pipe cold-saw technology from West Germany's Tremag Company, production was consigned to Mitsubishi Electric. The Tremag Model VRU-16, a saw with a proven record at the Vöest Company (Austria), was used as a model for the development of a new cold saw, now under production, that incorporates automatic control to meet the needs of Japanese steel manufacturers. The article describes this pipe saw and reports test-operation results.

## 『核融合』特集号に寄せて

東京大学工学部電気工学科教授 工学博士 関 口 忠



1955年、第1回原子力平和利用国際会議の席上、議長を務めたインドの核物理学者バーバー博士が、『今から四半世紀後には、核融合が新しい原子力平和利用としてものになるであろう』という意味の予言をした。当時は物騒な兵器をより効率的につくる為の豊富な中性子源開発を意図した現在以上の米ソ冷戦時代にあり、主に米英ソで秘密研究として進められていたので、これは相当な“爆弾”発言であったと想像される。これが誘引となって3年後(1958年)第2回の同じ国際会議でその秘密研究のヴェールが脱がれ、本格的な核融合研究が開始されたと見てよかろう。

それから現実に四半世紀が過ぎた今日、核融合開発もようやく動力炉実現の第一閂門である“臨界プラズマ条件”の達成を指呼の間に期待できる段階にまで到達した。核融合のような超大型開発にあっては、①科学的実証、②技術的実証、③経済性および社会受容性の実証と、3～4段階の閂門をクリヤーする必要があるとされる。物理学者であるバーバー博士の予言が、『エネルギー供給を実現している』という意味であれば全くの的はずれであるが、①の段階をクリヤーして②に進むという意味であれば的を射たと解することもできる。何かの因縁で当初からこの分野に足を踏み入れて来た筆者にとっては、核融合もやっと此処まで来たとの感が深い。

我が国のプラズマ・核融合研究は、1950年代末頃の大論争を経て、一挙に大型プラズマ装置は建設せず、基礎学問の充実と人材養成から始めるべしとの結論から、1961年に全国大学の中枢共同研究機関としてのプラズマ研究所が名大付置として新設され、主に基礎プラズマの理論および実験の分野で特徴ある多くの貢献をした。次いで1970年初頭から原子力委員会においても本格的にこれを取上げる気運が開かれ、1975年に「核融合会議」が発足、日本原子力研究所のトカマク路線を中心とし、“国のプロジェクト”として研究開発の推進を計る事とし、現今のJT-60の建設および将来の炉実現の為の幅広い技術開発の実施段階に入っている。

この様に、第1段階の科学的実証は、現在最も先行しているトカマク形と呼ばれる磁気閉じ込め方式による、日米ソおよびECの4つの大型装置の建設・運転を通じて行われようとしている。事実、世界中の多くのこの方式の装置による最近の進展は特に目覚しい。しかし前記の第2、3段階までを考慮すると、定常運転化(環状プラ

ラズマ電流の駆動)、小形化(高β化)、エネルギー取出しの為のブランケット部を含む炉全体構成の簡略化と保守性の向上など、なお多くの問題があり、鋭意解決・改善の努力が傾注されている。

一方、“非トカマク方式”的炉心候補としても多くのものがあり、トカマクに続いて雁行して進展しつつある。トカマクとの優劣対比により、競争の上、経費面の許す限り開口を拡げておく事が、長期的な国視点からは望ましい。この観点から、我が国でも1970年代後半から、プラズマ研究所の他に、京大ヘリオトロン、阪大レーザ核融合、筑波大タンデム・ミラー等、主として大学関係で可成り大型のプロジェクト研究が開始され、成果が出始めている。

かくして、我が国は現在、米ソおよびECに伍して、核融合開発4大ブロックの一つとして第一級レベルにあり、誠にご同慶の至りである。これは研究者の努力もさることながら、産業界の世界一級の技術力による所誠に多大であって、国際的にも高く評価されている。

しかし、今後技術開発の本格化に伴って、ますます厳しい選択を迫られる事になろう。それは、核融合開発が炉心プラズマ関係の推進・選択の他に、エネルギー取り出しの為の関連分野が極めて多岐に亘っていて、しかもその一つ一つに多額の経費を要するからである。従って、現在でも研究開発経費の適性配分に苦慮していると云うのが世界各ブロックの実情である。国際協力の重要性が強調されるのもまたこの理由による。

『核融合は何時頃になりますかね？先生が生きている間に出来ますか？』との質問をよく受ける。『少なくとも第2段階の技術開発のめどがついてから死ぬつもりですがね』、また『そもそも海の水を燃料とする(重水素の他に、ウランの数十倍含有率が高いトリチウムの原料となるリチウムも海水から分離するとして)一次エネルギーの開発と云うような“人類の一大挑戦”がそんなに簡単に出来ては却って面白くないですよ!!』などと答える事にしている。特に我が国にとっては、厳密な意味で成功の保障がない段階から国の大規模プロジェクトとして強力に進めるに至った最初の経験であり、日本人特有のせっかちさでは目標の達成は困難と感じる。産業界におかれでは、当面は国の研究開発への参加という形ではあっても、いずれは開発を主導する立場におかれる筈であり、今から透徹した長期戦略の観点でご努力頂きたいものと念じている次第である。

## 核融合研究開発の歩みと今後の課題

富永正太郎\*・森川鐵也\*・浅見直人\*\*・郡正治\*\*\*

## 1. まえがき

核融合の研究開発は、国のプロジェクトとして積極的に推進され、特にトカマク型核融合実験装置においては、臨界プラズマ条件（核融合反応を起こさせるためにプラズマに加えたエネルギーと発生したエネルギーがちょうど釣り合う条件）の達成を目前にする段階にある。また同型による核融合炉の設計検討も並行して進められており、研究開発の進展は著しいものがある。

この間、三菱グループ（三菱電機（株）、三菱重工業（株）、三菱原子力工業（株）は、メーカーの立場から総合力と経験を生かし、積極的に参画し、核融合の研究開発の進展とともに歩んできた。この特集では、その一端を紹介し、今後の課題について概説する。

## 2. 核融合開発の進展

人類の究極のエネルギー源と言われている核融合は、重水素、三重水素（トリチウム）などの“軽い”原子核を衝突、結合（融合）させ、その際放出される莫大なエネルギーを利用しようとするもので、具体的には、これらの原子核を高温（1億度以上）に加熱し、プラズマの状態で、ある空間に閉じ込める必要がある。

プラズマの閉じ込め方式は、磁気閉じ込めと慣性閉じ込めの2方式に大別され、その各々にもいろいろの方式があり、世界各国で研究

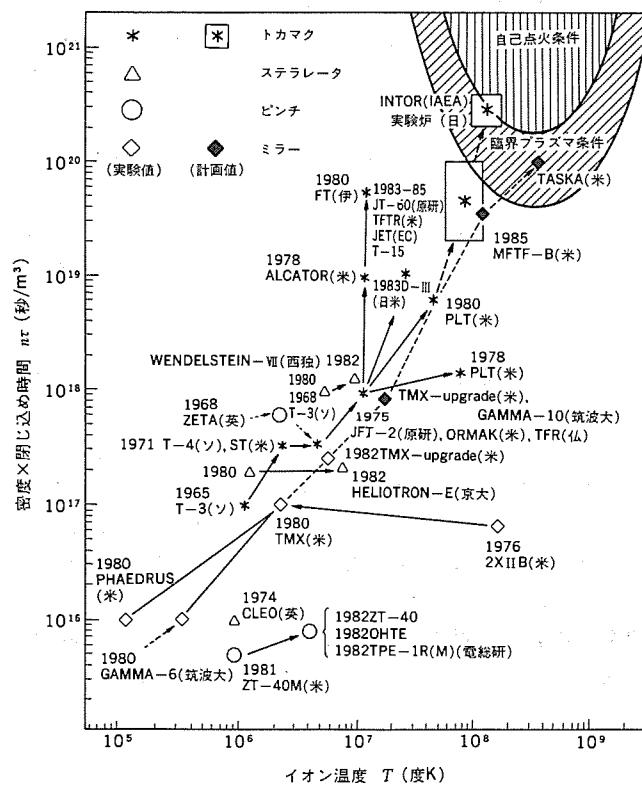


図 1. 閉じ込め方式別の核融合研究開発の現状  
(昭和 59 年度原子力ポケットブック)

開発されている。現在、最も多くの研究開発が進められている磁気閉じ込め方式の進展を図 1. (1) に示す。

現時点においては、世界的に見てもトカマク型が最も進んでおり、臨界プラズマ条件の達成を目指す装置として、我が国の JT-60、米国の TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)、ヨーロッパ連合の JET (Joint European Torus)、ソ連の T-15 がある。TFTR は昭和 57 年 12 月、JET は同 58 年 6 月にそれぞれプラズマを初点火し、徐々に性能をあげつつある。JT-60 は日本原子力研究所（以下、原研と称す）において昭和 60 年春の完成を目指し順調に建設が進められており、JT-60、TFTR、JET、共に同 61 年頃、臨界プラズマ試験に入ると予想されている。

一方、大学、国立試験研究機関などにおいては各種閉じ込め方式の研究、核反応プラズマ研究など幅広い分野で基礎的研究が行われている。

## 3. 三菱の歩み

核融合研究開発の進展のなかで、三菱グループは企業の立場から、各研究所、各大学の核融合実験装置の設計・建設計画に初期の段階から

表 1. 核融合実験装置／周辺設備納入実績（昭和 59 年 1 月現在）

納入年 (昭和)	納 入 先	装置／設備名	備 考
54	名古屋大学プラズマ研究所	“STP-3”	軸対称トロイダルビンチ型実験装置
55	京都大学理学部	高周波加熱装置	“WT-II”用 LHH 加熱装置
56	京都大学ヘリオトロン核融合研究センター	〃	“WT-II”用 ECH 加熱装置
56	〃	“ヘリオトロン-DR”	ヘリオトロン型実験装置
57	名古屋大学プラズマ研究所	“SPAC-IV-DR”	ビンチ型実験装置
57	京都大学ヘリオトロン核融合研究センター	高周波加熱装置	“ヘリオトロン-DR”用 ECH 加熱装置
58	日本原子力研究所	“JFT-2M”	高性能トカマク開発試験装置
58	名古屋大学プラズマ研究所	“STP-3M”	逆磁場ビンチ型実験装置
58	日本原子力研究所	“JT-60 二次冷却設備”	
58	京都大学ヘリオトロン核融合研究センター	高周波加熱装置	“ヘリオトロン E”用 ICRF 加熱装置
58	三菱電機（株）中央研究所	核融合実験装置	逆磁場テータビンチ型実験装置
58	〃	〃	“ヘリオトロン E”用 ECH 加熱装置
59 (製作中)	日本原子力研究所	“JT-60 トロイダル電源”	フライホイール発電機と整流器システム
59 (製作中)	名古屋大学プラズマ研究所	高周波加熱装置	“JFT-2M”用 ECH 加熱装置
59 (製作中)	名古屋大学プラズマ研究所	〃	“NBT-TM”用 ECH 加熱装置
60 (製作中)	日本原子力研究所	トリチウムプロセス研究棟	

表 2. R&amp;D 機器納入実績 (昭和 59 年 1 月現在)

納入年 (昭和)	納 入 先	機 器 名	備 考
54	日本原子力研究所	超電導コイル	7T クラスター・テスト コイル
56	"	超高真空メタルシールゲート・バルブ	"JT-60" NBI 用原型
56	"	高速度シャッタ	"
57	"	超電導コイル	12T Nb <sub>3</sub> Sn スプリット コイル
57	名古屋大学プラズマ研究所	"	200 T/s パルスコイル
57	日本原子力研究所	"	50 kA パルスコイル
57	"	流下波膜式分離予備 実験装置	トリチウム処理基礎実 験用
57	"	深冷分離基礎実験装置	"
58	"	リッジ導波管	"JFT-2M" ICRF 用アンテナ
59 (製作中)	"	ペレット入射装置	"JFT-2M" 用

ら参画し、その一翼を担ってきた。これらの実績の概要を表 1., 表 2. に示す。

特筆すべきは、昭和 58 年 4 月、原研・東海研究所へ納入した高性能トカマク開発試験装置 "JFT-2M" である。この装置はトカマク装置の最適化施策の研究開発を目的として建設されたもので、現在我が国で稼働中の最大規模の核融合実験装置である。本体部の製作は、昭和 56 年度から開始し、同 58 年 4 月に納入、引き続き原研により計測器、加熱装置などが付加され、実験が開始された。同年 4 月末には 150 kA・0.15 秒の初期プラズマが得られ、同年 6 月にはプラズマ電流 300 kA の円形断面プラズマを 0.5 秒継続することに成功し、その後も順調に運転されている。

今後の計画では、非円形プラズマ用制御電源、高周波加熱装置、新計測診断機器などが設置され、本格的な実験研究が行われる予定である。

なお、この装置は将来の核融合実験炉の設計などから要求される、大胆な試みを機動的に行える規模であり<sup>(2)</sup>、その成果が期待されている。

#### 4. 今後の技術課題

我が国における核融合研究開発は着実に進展し、今日では具体的に核融合炉を念頭において研究開発段階に入りつつあり、昭和 57 年 6 月原子力委員会により策定された「原子力開発利用長期計画」において、[次の目標は、1990 年代後半に自己点火条件（外部からエネルギーを与えることなしに核融合反応が持続する条件）を達成し、核融合が炉として実現し得ることを技術的に立証することであり、このため、トカマク方式の改良研究、高エネルギー中性子流に耐え得る材料の開発をはじめ遠隔保守、トリチウムの取扱、熱輸送、超電導などに関する工学的研究開発及び安全性に関する研究を進めるとともに、臨界プラズマの諸特性などに関する実験・研究を積み重ねていくこととする]<sup>(3)</sup>としている。

トカマク炉の工学上の主要設計課題のほとんどは、炉心プラズマ設計と直接関連しており、炉本体システム設計の基本は炉心プラズマ設計と関連する工学技術との整合性をいかに図るかにある。

課題としては、不純物制御、He 排気に関連するダイバータ／リミッ

タ方式の検討、高熱負荷に対する第一壁／ブランケットの構造設計の検討、プラズマの立上げ及び停止法とトカマクの運転の達成、ブランケット増殖材の検討、中性子流に対する遮へい体の開発、大形超電導マグネットシステムの開発、プラズマ加熱装置、特に高出力の ICRF (イオンサイクロトロン周波数帯) 加熱・ECRF (電子サイクロトロン共鳴周波数帯) 加熱装置の開発、トリチウムシステムの技術開発など多岐に及び、材料技術、計測技術、保守点検技術を含めた広範囲な分野にわたる研究開発が必要である。

このように核融合炉の実現のためには、炉心プラズマに関する研究開発に併せ、炉を製作するための炉心工学技術、炉工学技術の研究開発が進められなければならない。

三菱グループは、トカマク基本設計、核熱解析、真空・超高真空、ブランケット、超電導コイルシステム、プラズマ加熱装置、炉解体修理、真空排気、トリチウム系統、燃料ペレット、電源・制御、及びプラズマ計測、データ処理など広い分野にわたり技術の研究開発を進めている。これと並行して、自己点火条件の達成を目指した原研の核融合実験炉 FER (Fusion Experimental Reactor)、D-T 反応プラズマの発生を目指とした名古屋大学プラズマ研究所の R 計画、及び国際協力で進められている INTOR (International Tokamak Reactor) などの計画に参画し、課題の検討に努めている。

#### 5. む す び

核融合炉の実現は、人類の究極のエネルギー源を我が手にすることを意味するとともに、研究開発の過程において多くの先端技術を生み、その波及効果も大きく極めて大きな意義をもつものである。

核融合研究開発の課題は多く残されているが、着実に解決されていくものと思われる。我々はメーカーの立場から、これまでに蓄積された技術に加え、新技術を開発し核融合の発展に寄与したいと考えている。終りに、三菱グループがこれまでに納めたかずかずの成果は、原研、大学関係など研究機関の御指導によるところが大きく関係各位に厚く御礼申しあげる。

#### 参 考 文 献

- (1) 原子力産業会議：原子力ポケットブック
- (2) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状（昭 58）
- (3) 原子力委員会：原子力開発利用長期計画（昭 57-6）

#### 三菱核融合開発室 "MFC" (Mitsubishi Fusion Center の紹介)

三菱電機(株)、三菱重工業(株)、三菱原子力工業(株)の三社は、今般、日本原子力研究所に納入した高性能トカマク開発試験装置 (JFT-2M) の完成を契機として、今後の核融合開発体制を一層強化するため、昭和 58 年 5 月 1 日付で三菱電機(株)本社ビル内に「三菱核融合開発室」を設置した。

三菱核融合開発室では、これまで三社で個々に進めていた核融合の本体設備及び周辺設備・系統のシステム設計をはじめとするシステムエンジニアリング業務を結集し、経営資源の集中化と開発効率の向上を図っている。三菱グループは、これまで JFT-2M など各種の核融合装置の設計製作及び主要構成機器の R&D など核融合開発において重要な役割を担ってきたが、今回の「開発室」の設置により、核融合開発に対する三菱グループの貢献度をより高め得るものと確信している。今後ともより一層の御指導、御助言のほどお願いしたい。

## 核融合炉の設計研究と技術開発

富田 晴彦\*・塚本 忠則\*・今村 豊\*\*・富田 充\*\*・笠井 雅夫\*\*\*・伊尾木公裕†

## 1. まえがき

臨界プラズマ条件の達成を目指す世界の4大トカマク型プラズマ実験装置の中、米国のTFTR、ECのJETは既にプラズマの着火を達成し、日本原子力研究所(以下、原研と称す)のJT-60は装置の完成が間近にせまっている。臨界プラズマ条件は、これらの装置によってここ数年の中に達成されると見られており、次の目標はD-T核融合反応と自己点火条件の実現となる。

我が国におけるこれらの計画としては、自己点火条件の達成を目指す原研の核融合実験炉、核反応プラズマ実験を行う名古屋大学プラズマ研究所(以下、名大プラ研と称す)のR計画がある。三菱グループでは、これらの計画に積極的に参加して核融合炉の設計研究を行うと共に、グループ各社内においてもR&Dを行って技術の蓄積と向上に努めている。

## 2. 核融合実験炉(FER)の概念設計

原研では、現在建設中のJT-60に続く次期装置として、核融合実験炉<sup>(1)</sup>(Fusion Experimental Reactor: FER)を計画中である。次期装置に関する概念設計は昭和50年代の初めに開始され、昭和56年度から始まった実験炉概念設計へと受け継がれてきているが、三菱グループは次期装置設計開始時からこれに参加して、炉本体とその周辺設備を含むシステムの検討作業を行ってきた。以下に三菱グループが実施した昭和57年度実験炉の概念設計に基づいてその概要を述べる。

## 2.1 設計の概要

FERの主要パラメーターと炉本体構造を表1、図1に示す。本体を

表1. FERの主要パラメータ

プラズマ パラメータ	プラズマ大半径/小半径 軸上トロイダル磁場 プラズマ電流 平均イオン温度/密度 総熱出力	5.5 m/1.1 m 5.7 T 5.3 MA 10 keV/1.4 × 10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup> 440 MW
ブランケット	構造材 トリチウム増殖材 トリチウム増殖比	ステンレス鋼 Li <sub>2</sub> O 1.05
トロイダル 磁場コイル	コイル数 最大許容磁場 導体	14 12 T Nb <sub>3</sub> Sn/NbTi
ポロイダル 磁場コイル	最大許容磁場 導体	8 T NbTi
加熱系	中性粒子入射加熱 高周波加熱	30 MW 30 MW/88 MHz (ICRF) 10 MW/140 GHz (ECRF)

構成する主要なコンポーネントとしては、プラズマに近い方から核融合エネルギーの熱化と燃料トリチウムの増殖を行うブランケット(前面板が第一壁を形成する)、不純物を制御するダイバータ、放射線遮へい体、プラズマ真空容器(後述のクライオスタット壁を兼ねる)、プラズマ閉じ込め用の磁場を作る超電導コイル、超電導コイル断熱用のクライオスタットなどである。FER本体設計の主要なポイントは、過酷な熱・粒子負荷、強大な電磁力に耐え、必要なトリチウム増殖比とプラズマ制御特性をもち、遠隔操作による分解・再組立が可能で、できるだけコンパクトな炉構造を設計することにある。

このような観点から設計されたFERの昭和57年度設計では、クライオスタットはすべてのコイルを収納するベルジヤ構造を採用し、内側クライオスタットの壁がプラズマ真空容器の壁を兼ねる、いわゆる“共通型”を採用して、装置のコンパクト化を図った。遮へい体は、ブランケット分解修理時の取扱重量の軽減と、このときの超電導コイルの放射線防護のために、クライオスタットと一体化する方式を採用した。ブランケット、ダイバータは、モジュールを結合した構造を採用し、分解修理時にはモジュール間の結合を外して、各トロイダルコイル間から取り出しができる。モジュールの引出しあは、トロイダル方向への回転移動後、主半径向方向への直線引出しとして、主要な遠隔操作機器についても設計を行った。

排気、加熱用のダクトは、トロイダル磁場コイルに作用する転倒力支持構造物をできるだけ広い範囲に入れるために、すべて装置の赤道面に設けた。ブランケットは、Li<sub>2</sub>Oを増殖材としたチューブインシェル構造、その前面をなす第一壁は熱応力低減のためのグループ構造とし、それぞれ詳細な熱、電磁力に対する解析を行って、材料、構造を選定した。ダイバータは、タンクステンアーマー材付きの銅管構造とし、熱、スパッタリングに対する解析を行った。トロイダル磁場コイルに発生する最大磁界は11.8 Tになるため、高磁界側でNb<sub>3</sub>Sn導体、低磁界側でNbTi導体を用いた。

トロイダル磁場コイルの向心力は中心支持柱で、転倒力は転倒力支持構造物で支持する構造とし、電磁力に対する詳細な応力解析と評価を行った。ポロイダル磁場コイルに発生する最大磁界は7.2 Tであるため、NbTi導体を用い、コイル配置、アンペアターンの配分については、プラズマ特性、蓄積エネルギー、電源容量、本体構造との整合などについて比較検討を行って設計した。

第2段加熱装置としては、イオンサイクロトロン周波数帯加熱装置と中性粒子入射加熱装置を用い、プラズマの予備電離用としては、電子サイクロトロン共鳴加熱装置を用いた。電子サイクロトロン共鳴加熱装置としては、本体との結合構造が簡単なビーム伝送方式により弱磁場側(装置の外周側)から入射する方式について検討した。電源系については、ポロイダル磁場コイル用電源、高周波加熱用電源を中心に設計を行い、ポロイダル磁場コイル用電源の制御方式についても検討を行った。燃料吸排気系については、真空排気系、燃料循環システム、ブランケットトリチウム回収システム、一次冷却水処理システム、トリチウム格納システム、トリチウム廃棄物処理システムの設計を行い主要機器の概念を明

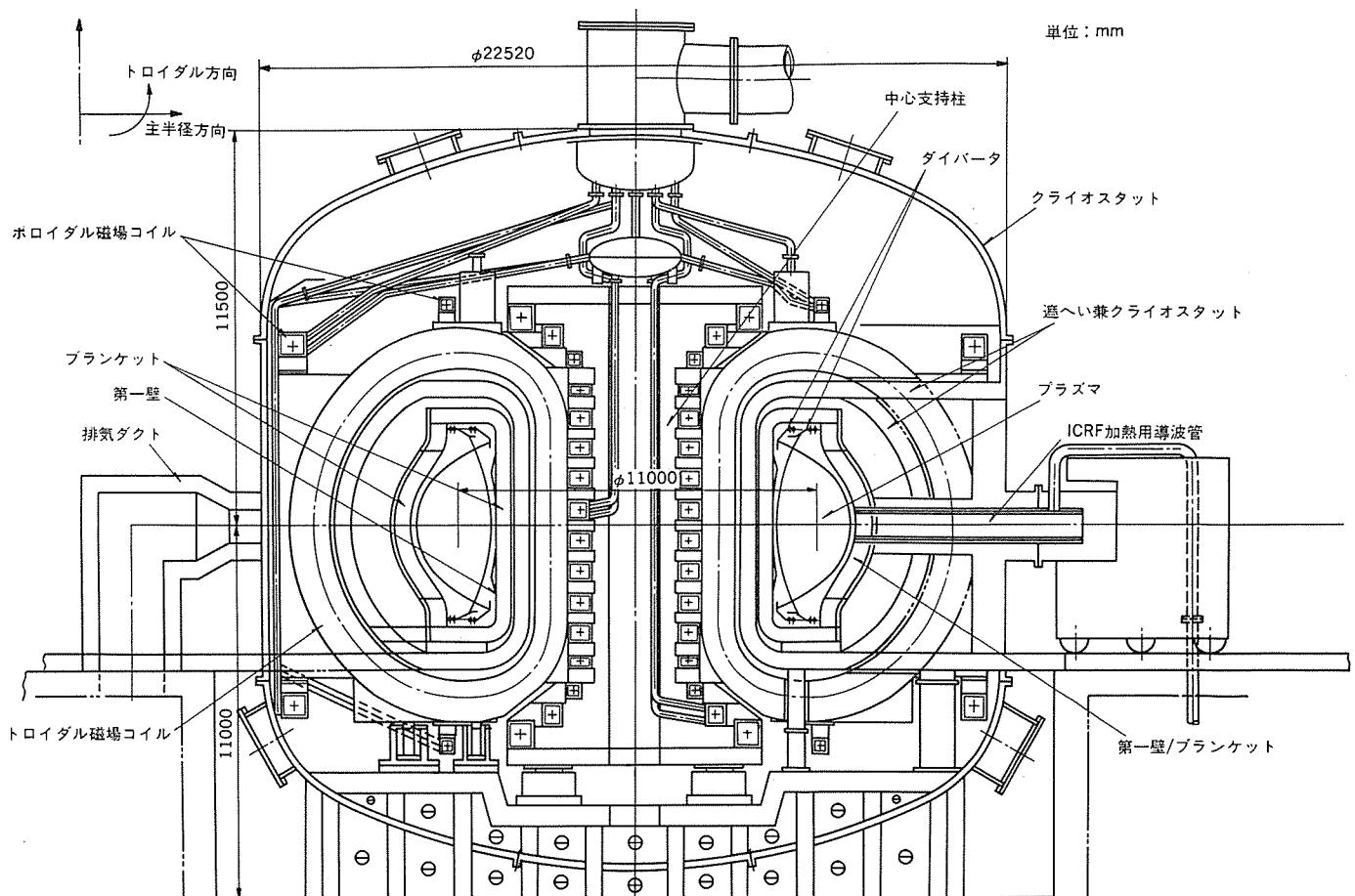
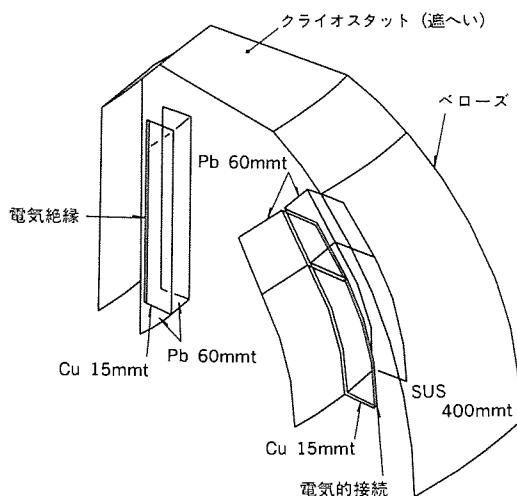


図 1. FER 炉本体構造概念図



( a ) 計算 モデル

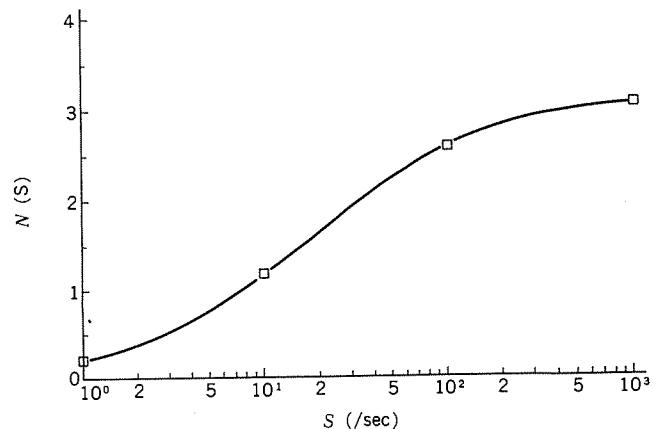


図 2. 電磁気解析モデルと結果の一例

らかにした。

その他、超電導コイル冷凍系、装置冷却系、本体建屋内配置についても設計を行い、併せて主要なR&D項目の抽出と検討を行った。

## 2.2 電磁氣設計<sup>(2)(3)(4)</sup>

FER では、閉じ込め効率向上のために縦長断面 プラズマを生成するが、縦長断面 プラズマは上下方向位置が不安定となる。プラズマの上下方向への動きは非常に早く、そのままではフィードバック制御によって

制御することができない。これを解決するには、ブランケット部に導電性の良いシェル構造を設け、プラズマとシェル間の電磁気的効果（シェル効果）によって、フィードバック制御ができるレベルまでプラズマの動きを遅めてやる必要がある。このため、ブランケット、クライオスタッフ・遮へい体を含めた実機構造に近いモデルを用いて詳細な解析とシミュレーションを行い、プラズマ制御可能なブランケットのシェル構造を設計し、更に制御電源容量の評価も行った。

図2. に計算モデルと解析結果の一例を示す。ブランケットのシェル効果を向上させると、プラズマディスラッシュ時の電磁力が過大となり、トリウムの増殖比が低下するため、これら三つの点から整合のとれたブランケットの構造設計をすることは、実験炉設計の中でも重要なポイントとなる。我々は、制御コイルも含めた総合的な検討を今後とも重点的に実施して行く所存である。

### 3. 名大R計画の設計検討

#### 3.1 核融合研究におけるR計画の位置づけ

名古屋大学プラズマ研究所で計画中のR計画 (Reacting Plasmaの頭文字をとったもの) は、D-T核反応プラズマ研究計画を推進させるための装置であり、核反応が生ずることで誘起されるであろう物理的問題と装置の工学的問題の解明を目的としている。R計画の実験成果は JIPPT IIU, JFT-2M, JT-60での実験成果とともに、核融合実験炉実現に大きく寄与することが期待されている。このR計画の主要諸元は、①プラズマ主半径が2m前後、②核融合出力6MW程度であり、その最大の特徴はアルミ合金製トカマク装置であるということである。

#### 3.2 装置の特徴

R計画の設計は、昭和56年度から開始されたが、当初、表2の基本パラメータに示すように、真空容器にステンレス鋼が、またコイル棒に高マンガン鋼が使用されていた。そのためD-T反応を1ショット行った後、約1~2週間経過しても誘導放射能のため、人間が装置に接近することができなくなる。したがって、ステンレス鋼などを使用

表2. R装置の基本パラメータ

	パラメータ	一次設計 (昭和56年12月)	二次設計 (昭和58年2月)
プラズマ	平均電子温度 (keV)	~5	~5
	平均密度 (1/cm <sup>3</sup> )	~5×10 <sup>13</sup>	~5×10 <sup>13</sup>
	エネルギー閉じ込み時間(s)	~0.1	~0.15
	主半径 (m)	2.1	2.09
	小半径 (m)	0.6	0.76
	だ円率	1.0	1.55 (標準) 1.0~1.8 (実験範囲)
	加熱入力 (MW)	15	15
	エネルギー利得 (Q)	~0.3	~0.3
	プラズマ電流 I <sub>p</sub> (MA)	1.8	3.03
	放電時間 (s)	1.5	4sec, option 6sec
真空容器	運転周期 (min)	5	5
	安全係数 q*	2.33	2.3
	主半径 (m)	2.23	2.1
	小半径 (m)	0.89 (内径)	0.84
	一周抵抗 (mΩ)	0.5	絶縁ブレーキ
	ベーキング温度 (°C)	250	≤120
	材料(厚肉部)	SUS 304	Al合金
	材料(ベローズ部)	インコネル 625	Al 6063 + Al 2219 (Vac. Vessel)(Coil Frame)
	リミター	軸対称バンパー	Coil conductor —○— Cu (0.3s Mn) —●— Cu —×— Al 2219 (0.3s Mn) —□— Al 2219
	トロイダル磁場コイル	発生磁場強度 (T) コイル数 (個) 全起磁力 (MAT) 磁場リップル (%) 導体材料 コイル棒	5.0 (R=2.1) 14 52.5 1.4 銀入り鋼 高マンガン鋼

した装置では、遠隔操作技術が不可欠である。このような観点から、遠隔操作による分解組立を考慮した装置設計を実施したが、中性子に対する本体遮へい体の存在が装置の遠隔操作を困難としており、この目的に合致する遠隔操作技術の開発には、かなりのR&Dと期間が必要と考えられた。したがって遠隔操作装置を完備した一次設計仕様の装置を所期の期間で建設することは極めて困難であると判断された。

上記の経緯から半減期が短かく、約1~2週間後において、誘導放射能レベルが低くなる元素によって構成される材料(低放射化材料)を、ステンレス鋼の代替として用いる低放射化装置の構想が浮上してきた<sup>(5)</sup>。低放射化材料としてはMg, Al, V, Pb, Nbなどがあるが、①熱的特性を考慮した機械的強度、②電気的特性、③製作性、④市場性、⑤1~2週間後の放射能レベルなどの観点から、アルミ合金が選択された。種々の材料でR装置を製作した場合の誘導放射能の比較を図3に示す。図からわかるように真空容器及びトロイダル磁場コイル棒をアルミ合金とした場合⑦は、ステンレス系を使用した場合⑤に比較し、ショット後2週間で線量率が二桁以上低くなることとなり、実験期間中の保守・修理が容易になると思われる。

#### 3.3 アルミ合金製トカマク装置の設計における課題

アルミ合金製トカマク装置の設計における技術的課題は、アルミ合金の材料並びに加工特性に起因している。すなわち、アルミ合金はステンレス鋼と比較し、①機械的強度が比較的弱く、②電気伝導率が高いため、渦電流が流れやすく、③高温で連続使用すると強度が低下する場合があり、④加工、溶接などについても制限が多い。したがって、アルミ合金を使用してR装置を設計するには、以下のことに留意する必要がある。

①機械的強度が弱いため、寸法が同じなら磁場値を下げる必要がある。②プラズマ・ディスラッシュ時などに、低抵抗である真空容器及びコイル棒などに渦電流を誘起し、大きな電磁力が作用することが考えられるので、渦電流低減対策を施す必要がある。③機械的強度の低下をもたらすような高温下で使用しない。したがって冷却系の設計に注力する必要がある。④溶接強度が部材強度に比べ低下するので、溶接を使わぬ構造とするか、応力の低い箇所で溶接する

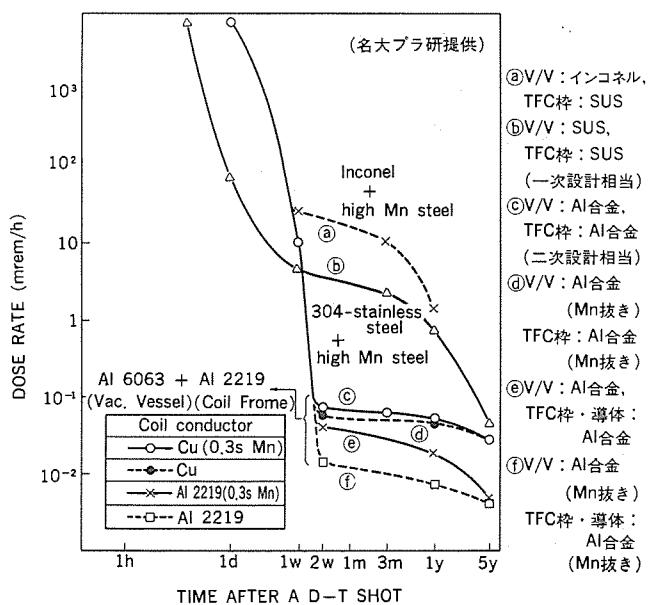


図3. 1回のD-T放電後の誘導放射能の時間変化<sup>(7)</sup>

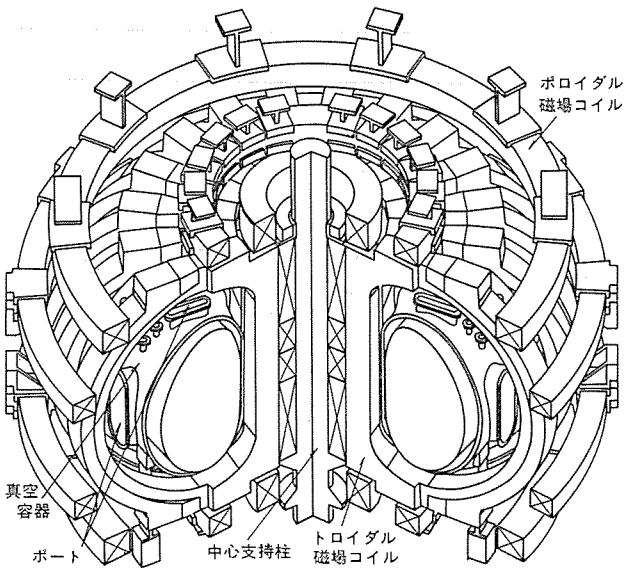


図 4. R 装置の鳥瞰図

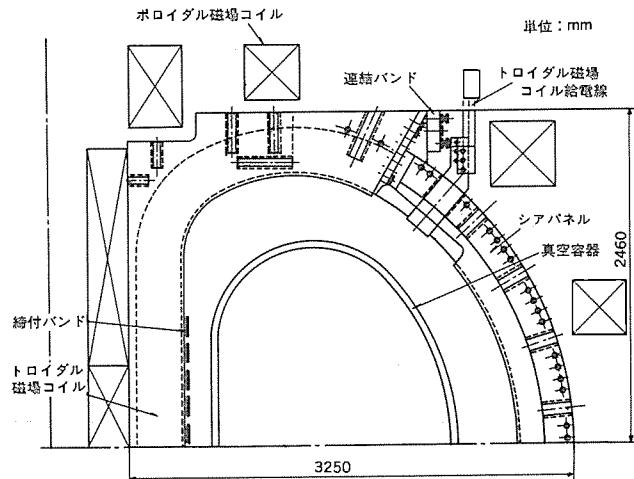


図 5. トロイダルコイルのバンド結束構造

などの工夫が必要である。

#### 3.4 R 装置における三菱提案<sup>(1)</sup>

二次設計仕様による三菱設計案のちょうかん(鳥瞰)図を図 4. に示す。この案には前述したアルミ合金装置に関する技術的課題の対応案が反映されている。以下技術的特徴について主なものの概要を紹介する。

##### (1) トロイダル磁場コイルのバンド結束方式

二次設計のトロイダル磁場コイルは、20 本からなる。コイル 1 本当たり約 1,700 t の向心力が働くが、その向心力を支持するのに、コイルのウェッジ部でくさび効果により支持する仕様となっている。この方式では、各コイル間の接触を十分にすることが必要であり、これを積極的に行う方法として、トロイダルコイルの上・下部分に力を与える方法、トロイダルコイルの直線部をバンドで締め付ける方法などが考えられるが、今回はコイルの直線部が長いことを考慮して後者を提案した。

その構造図を図 5. に、バンドによる結束効果を図 6. に示す。具体的には、①プレコンプレッションを付加することにより、コイルの励磁の有無で変形量に大きな差がなくなる。②運搬などによる変形をある程度矯正が可能である。③トロイダル磁場コイル間のずれ止めとしても有効である。などの効果が得られる。バンドの材質としてアルミ

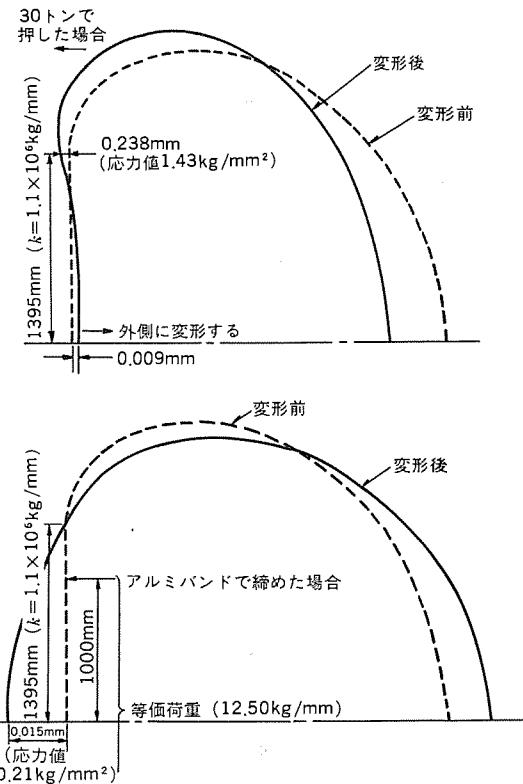


図 6. トロイダルコイルのバンド結束の効果

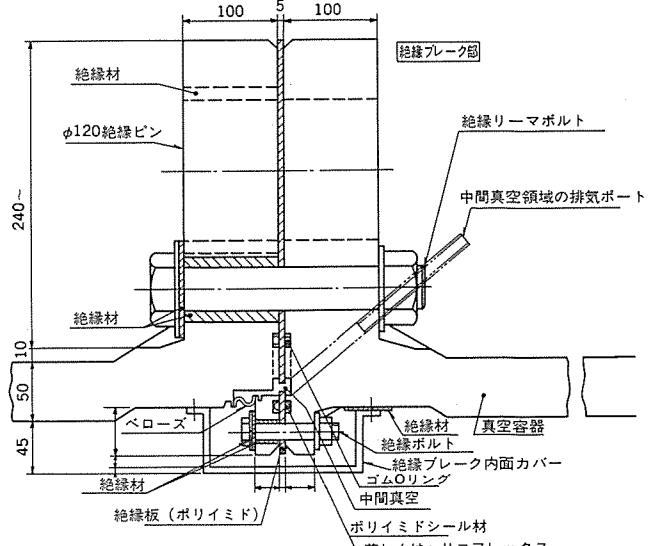


図 7. 絶縁ブレーキ部構造

合金を使用したため、渦電流低減対策から軸方向に 10 分割、トロイダル方向に 2箇所の絶縁ブレーキ部を設けた。

##### (2) 真空容器の絶縁ブレーキ部構造

真空容器の材料として、アルミ合金を使用するため、渦電流低減対策は重要である。真空容器はトロイダル方向に 4 箇所で分割されており、四つの 90° セクターから構成される。1 セクターはトロイダル方向中央部に 1 箇所の絶縁シール部を設けており、1 周抵抗は絶縁板により確保するという仕様になっている。絶縁シール部としての必要条件は、①各セクターのくら(鞍)型電流による大きな電磁力が支持できること、②真空シール性が保持できること、③アウトガス量が小さいことなどである。鞍型電磁力に対しては、円弧部では絶縁ピン、直線部ではスペースがないため、絶縁リーマボルトを使用し、荷重時の変

表 3. 核融合炉を対象として開発済み／開発中の技術 (代表例)

分野	内容	分野	内容
トカマク基本設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・磁場解析技術</li> <li>・渦電流・電磁力解析技術</li> <li>・プラズマ制御解析技術 (シェル効果, 制御)</li> <li>・システム感度解析技術</li> </ul>	プラズマ加熱	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NBI 機器技術 (ビームダンプ, カロリメータ, 高速シャッタ, 大口径金属ツール, 真空ゲート弁)</li> <li>・RF 機器技術 (ECRH 用ジャイロトロン電源, ICRH 用電源・伝送部アンテナ)</li> </ul>
核熱解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子, <math>\gamma</math> 線輸送計算</li> <li>・中性子, <math>\gamma</math> 線発熱解析</li> <li>・トリチウム堆積</li> <li>・遮へい</li> </ul>	炉解体修理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・真空容器リップシール自動溶接／切断装置開発</li> <li>・遠隔操作用ロボット／マニピュレータ技術</li> </ul>
真空／超高真空 (含む真空内部品)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超高真空技術 (放出ガス, フランジ, ガスケット, 摺動, シール)</li> <li>・真空容器製作技術 (JFT-2M 真空容器, Al 合金真空容器)</li> <li>・真空容器ベローズ技術 (JT-4 モデルベローズ, Al ベローズ, 強度解析手法)</li> <li>・真空内部品技術 (プローブ, リミター, ビームダンパー, 熱負荷試験)</li> </ul>	燃料ペレット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素同位体アイスペレット製造技術</li> <li>・アイスペレット入射技術 (空気銃式, 遠心式)</li> </ul>
プラズマケット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・核熱解析技術</li> <li>・冷却技術</li> <li>・構造強度解析技術</li> </ul>	真空排気	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クライオ・ポンプ技術 (コンデンセーション, ソーブション, トランピング)</li> <li>・クライオ・ポンプ用冷媒技術</li> </ul>
超電導コイル (含む極低温技術)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超電導体開発 (Nb<sub>3</sub>Sn, 12 T スプリットコイル, 20 MJ ポロイダルコイル導体, 200 T/S パルスコイル)</li> <li>・大形コイル製作技術 (クラスタテストコイル)</li> <li>・極低温技術 (超臨界・超流動冷却試験装置, 100 L/h 液化冷凍設備)</li> <li>・断熱構造技術 (試験用クライオスタット, パワーリード試作)</li> </ul>	トリチウム系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>・トリチウム回収精製技術 (深冷分離装置, 流下液膜装置, ゲッタ)</li> <li>・漏えいトリチウム回収技術 (空気中トリチウム回収装置)</li> </ul>
電源/制御		電源/制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー蓄積技術 (JT-60 トロイダルコイル電源, 超電導エネルギー貯蔵)</li> <li>・プラズマ制御技術 (ポロイダルコイル電流制御シミュレータ, プラズマ実験社内設備)</li> </ul>
プラズマ計測/データ処理		プラズマ計測/データ処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プラズマ制御技術 (プラズマ実験社内設備)</li> <li>・計測データ処理技術 ( )</li> </ul>
安全性/安全設備		安全性/安全設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故解析技術</li> <li>・プラント耐震解析技術</li> </ul>
プラント・エンジニアリング		プラント・エンジニアリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル・エンジニアリング</li> <li>・配置設計技術</li> <li>・CAD システム</li> </ul>

形量を最小限に抑える。また真空シールの信頼性を増すため、二重真空方式を採用する仕様になっている。当グループでは、電磁力荷重による変形が真空シール部に影響を及ぼさぬよう変位吸収用の小ベローズ方式を提案した。図 7. にその絶縁シール部構造を示す。

#### 4. 核融合炉に向けての技術開発

核融合炉を実現するためには、極めて多くの分野にわたる技術開発が必要である。三菱グループは、多年にわたりて核融合炉実現に必要な技術分野に関する設計・解析技術、基礎技術、加工・製作技術、計測・制御技術などの技術開発を進めてきた。その代表例を表 3. に示す。

#### 5. むすび

以上述べたように、三菱グループは FER 概念設計や R 計画などの国のプロジェクトに積極的に参加し、装置の設計研究を行うとともに、実機に必要な重要な技術開発を進めている。今後も関係諸機関の御指導を受けながら核融合炉の開発に向けて積極的に取り組んで行く所存である。

#### 参考文献

- (1) Tone, T., et al. : Conceptual Design of Fusion Experimental Reactor (FER), 5th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, Knoxville, April 26~28 (1983)
- (2) Kameari, A., et al. : Control of Vertical Position in Tokamak Reactors, to be Published.
- (3) Kameari, A., et al. : Eddy current analysis by the finite element circuit method, Pro. 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research (1977) pp. 15-85
- (4) Kameari, A., Transient Eddy current analysis on thin conductors with arbitrary connection and shapes, J. Comput. Phys., 42 (1981) pp. 124-140
- (5) 名古屋大学 プラズマ研究所 : 核融合反応 プラズマ実験装置技術報告 (IV), (昭 57-6)
- (6) 名古屋大学 プラズマ研究所 : 核融合反応 プラズマ実験装置技術報告 (V), (昭 58-3)
- (7) 名古屋大学 プラズマ研究所 : 核融合反応 プラズマ実験装置技術報告 (VI), (昭 58-9)

## 核融合実験装置

太田 広\*・成川武文\*・山田政男\*\*・内川高志\*\*\*・長田大三郎+・久野和雄+

## 1. まえがき

核融合の分野においては、近年相次いで各種実験装置が建設され実験研究の成果はめざましいものがあり、実験研究の進展につれて、装置もますます高度化、大形化の傾向にある。核融合実験装置の開発に関しては初期の段階から参画してきたが、本稿では最近製作、納入した代表的な装置について紹介する。

## 2. 高性能トカマク開発試験装置 (JFT-2 M)

JFT-2 M は、炉心プラズマの高性能化に関して、先端的研究を実施する装置として、日本原子力研究所（以下、原研と称す）が中心となり、1979年から検討が進められ、1981年に本体を受注し、1983年4月納入したもので、その後、原研により計測器などが据付けられ同年4月末から実験を開始した。装置は初点火後約2か月でプラズマ電流300 kA、閉じ込め時間  $23 \pm 5$  ms が得られ<sup>(1)</sup>現在に至るまで順調に運転されている。

表 1. JFT-2 M の主要諸元

項目		数値
機器	主半径 $R$ (m)	1.31
	断面幅 $2a$ (m)	0.7
	断面高 $2b$ (m)	1.06
器	非円形度	最大 1.7
	トロイダル磁束 $B_T$ (T)	1.5*
	変流器磁束 (V·S)	2
性	プラズマ電流 $I_P$ (MA)	0.5
	$B_T$ フラットトップ (s)	0.5~1
能	プラズマ温度 $T$ (keV)	3~4
	プラズマ密度 $n$ (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>14</sup>
	エネルギー閉じ込め時間 $T_E$ (s)	~0.05
	ベータ値 $\beta$ (%)	~5

注 \* トロイダル磁場コイルは、将来計画に備えて、4.2 T の設計になっている。

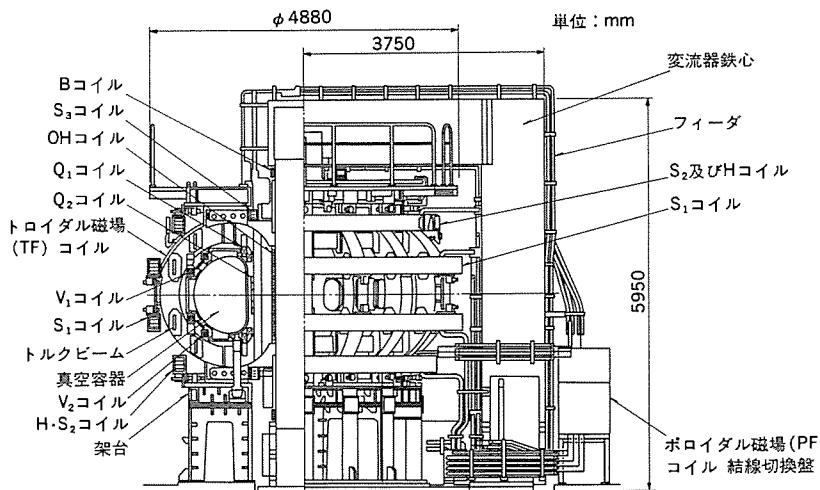


図 1. JFT-2 M 本体構造図

表 2. トロイダルコイルの設計諸元

項目	時期	
	現在	将来グレードアップ時
最大電流 (kA)	12.2	32.53
最大起磁力 (MAT)	9.37	25.0
中心磁場 (主半径1.25m) (T)	1.5	4.2
フラットトップ (s)	0.5	0.5
く形波換算通電時間 (s)	4.5	4.1
フラットトップ電圧 (V)	1,600	4,260
通電周期 (min)	2.5	10
磁気エネルギー (MJ)	19.35	138
ジュール損/shot (MJ)	87.7	568
冷却水量 (t/h)	27.1	54.3
冷却水圧力損失 (kg/cm <sup>2</sup> )	2	8

## 2. 1 装置の概要

この装置の建設目的は、トカマク炉心プラズマを高性能化する技術を究明し、現在検討が進められているトカマク核融合実験炉 (FER) などの設計にその成果を反映し、経済的なコンパクトな実験炉を開発することにある。炉心プラズマの高性能化に関して種々の課題があり、JFT-2 M では第二段加熱時のプラズマの径分布の制御、高周波加熱によるトカマクの定常運転、高ベータプラズマ域での第一壁の選択、ダイバータ、ペレット入射などの燃料の給排気システムなどの研究<sup>(2)</sup>が計画されている。表 1. に JFT-2 M の主要諸元を図 1. に本体外形を示す。

本体の特長として、16個のトロイダル磁場コイル及び真空容器は、D形形状を採用している。JFT-2 M のD形断面形状は、円形断面に比べてプラズマを効率的に発生することができると言われており、レーストラック形状に比べてコイルに作用する応力が軽減されるなどの利点があり、次期装置などで有望視されている形状である。

本体は既設の建屋に据え付ける制約などから、高さは約 6 m、トロイダル磁場コイル外径部は約 4.9 m、重量は約 230 t のコンパクトな装置とした。今回納めた本体のうち、主要部品であるトロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルの S<sub>1</sub>~S<sub>3</sub>コイルは、実験の増力計画 ( $I_P = 1$  MA,  $B_T = 4.2$  テスラのとき) でも使用できるよう製作されている。

## 2. 1. 1 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは、図 1. の断面に示すようにド

一ナット状の真空容器を取り囲んだ、高さ 2,770 mm、幅 1,790 mm、重量約 3.5 t の D 形状である。表 2. にトロイダル磁場コイルの定格を示す。

このコイルは既設の励磁電源との整合性、巻線性、巻線途中の導体接続や誤差磁場を少なくするなどの条件を満足させるために、中空導体を 3 本、並列巻線する方式を採用した。工作は、二つのパンケーキを合わせて巻線したものを絶縁処理し、一つのブロックとした。更に四つのブロックを一体化し、強大な電磁力を耐えるよう、ステンレスのキャップに入れて熱硬化レジンを真空含浸した。

トロイダル磁場コイルの設計で考慮しなければならない課題として、コイルに働く電磁力の影響がある。通電により、トロイダル磁場を作った際、コイルが外側に広がろうとする「拡張力」、中心に寄ろうとする「向心力」、後述のポロイダル磁場との相互作用により、コイルをトロイダル方向に倒そうとする「転倒力」が作用する。このうち、「拡張力」と「向心力」による応力解析結果を図 2. に示す。コイル 1 個の総作用力は 2,005 t、向心力 1,023 t、外方向 454 t の力が作用し、この力を支持するために、コイルをキャップに入れ、かつ「向心力」を中心部で支えるように設計した。

コイル通電波形はパルス的であり、コイルは 10 万回ショットの繰返し荷重に耐える必要がある。そこで導体材料を 1/2 H 無酸素銅とした疲労試験を実施し、強度的に十分であることを確認した。「転倒力」の支持は、トロイダル磁場コイルの相互間に 4 列のトルクビームを入れる方式とし、真空容器のポートのアクセス上、トルクビームの幅は極力狭くするよう配慮した。このトルクビーム方式も本体をコンパクトにまとめられた要因の一つである。

コイルは水冷方式で、冷却水温度差により生ずる導体間の温度差を避けるために、各パンケーキで 3 系統、一つのコイルで 24 系統、全コイルで 384 系統の冷却水系とした。冷却水流量は、1.5 T のとき、5

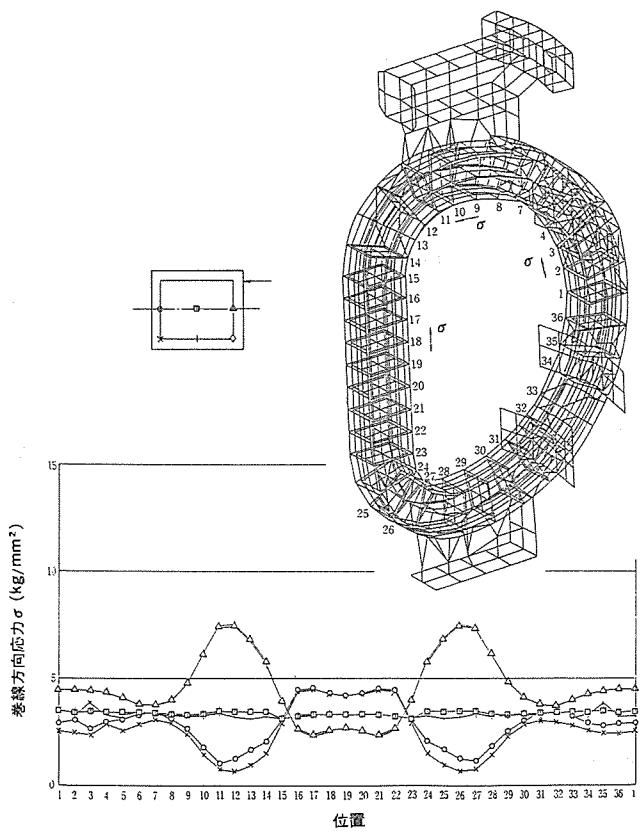


図 2. トロイダル磁場コイル応力分布図

分間隔のショット、将来 4.2 T のときは、10 分間隔で実験を実施するよう計画されている。

### 2.1.2 ポロイダル磁場コイル

真空容器と同心状に配置されたポロイダル磁場コイルは、プラズマの平衡、位置形状を制御するためのものであるが、コイル構成の単純化と制御電源設備の簡素化を図るためプラズマの電流、位置及び形状を一体化して制御するハイブリッドコイルシステムとして設計されている。

コイルは、主磁束の発生と共にプラズマの主半径を制御する  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_{3/4}$  コイル、プラズマの垂直位置を制御する  $H$  コイル、プラズマの断面形状やダイバータ配位を制御する  $Q$  コイル、プラズマの高ベータ化に伴いプラズマの平衡を早い速度でフィードバック制御する  $V$  コイル、ほかに変流器としてプラズマ中に電流を流し抵抗加熱する  $OH$  コイルと、2 V・S の磁束量を得るため予備励磁する  $B$  コイルからなる。

コイルのうち、 $Q$  コイルと  $V$  コイルは、制御速度及び磁場発生効率の向上を図るために、トロイダル磁場コイル内側に配置している。また、 $Q_1$  コイルは狭い空間に配置するため二つのブロックに分けている。 $Q_2$  コイルは、プラズマ平衡磁束が中心鉄心に引き寄せられ、プラズマを D 形断面形状に保持できなくなるのを防ぐため中央部に配置した。 $OH$  コイルは、プラズマ電流の増大時にも、鉄心を飽和させないよう、主磁束の漏れを少なくする位置に設置した。

$Q$  コイルと  $V$  コイルは、本体が 2 分割されているので、現地で接続する構造とした。特に  $V$  コイルは薄い導体を重ねた構造とし、ろう付け時の熱によるコイル導体の伸びを、応力ひずみとして導体中に極力残さないような構造と、作業方法を採用した。

各種の断面形状や高ベータプラズマを制御するのに必要な、多様な磁場配位と、その調整が可能なコイルターン数及び極性の変換は、結線切換盤に集中させ、端子の接続替えで容易にできるよう考慮した。ポロイダル磁場コイルの設計諸元は表 3. に示す。

### 2.1.3 真空容器

真空容器は、 $10^{-8}$  Torr レベルの超高真空雲囲気を形成して、内部にプラズマの生成・閉じ込めを行うためのものであり、高度の気密性と清浄度が要求される。また、多数の計測用ポートや各種内部品が設置され、プラズマとの相対位置や計測精度及び周辺構造との取合いなどの条件から厳しい製作精度が必要とされた。真空容器の外観及び主要目を各々図 3.、表 4. に示す。

真空容器は、外径 3,500 mm、内径 1,740 mm、高さ 1,240 mm のトーラス形状をしており、材質は SUS 304L である。JFT-2M 装置の特徴の一つは、D 形断面のプラズマを得ることであり、空間を最大限に利用するため真空容器の断面形状はプラズマ形状と相似の D 形が採用された。真空容器の胴部は 2 個の 180° セクターと 2 個の間挿部

表 3. ポロイダル磁場コイルの設計諸元

コイル	最大 AT(kAT)		総ターン数
	現在	グレードアップ時	
$S_1$	240.8	722.4	56
$S_2$	180.6	541.8	42
$S_{3/4}$	103.2	309.6	24
$S_{3/2}$	105	315.0	14
$V_1$	75	—	10
$V_2$	45	—	6
$Q_1$	60	—	8
$Q_{1/2}$	60	—	8
$Q_2$	60	—	8
$OH$	151.2	—	42
$H$	60.2	180.6	14
$B$	4	—	15

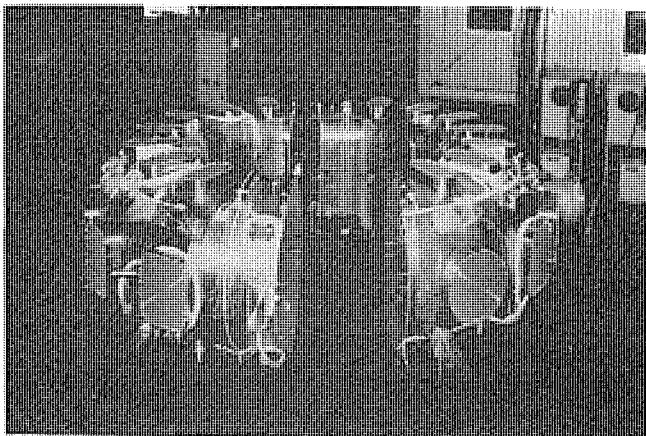


図 3. JFT-2 M 真空容器の外観

表 4. JFT-2 M 真空容器の主要目

項目	仕様
トーラス断面形状	D形
断面内径寸法 (m)	0.86(水平)×1.19(垂直)
材質	SUS 304 L
板厚 (mm)	25
内容積 (m <sup>3</sup> )	約 7
ポート総数	122 個 (大形ポート 44 個)
大形ポート真空シール	金属中空 O-リング
一周抵抗方式	PTFE (テフロン) 絶縁分割及び SiC シャント (分路) 抵抗設置
ベーキング温度 (°C)	120
到達真空度目標値 (Torr)	$1 \times 10^{-8}$
内部品取付台座数 (個)	>1,100
容器サポート数 (組)	8



図 4. JFT-2 M 真空容器の内部状況

から構成され、内部フランジにて結合されている。間接部は組立工程にてトーラス中心側のロイダル磁場コイルを接続する空間を確保するため設けられた。

真空容器の一周抵抗は、胴部の接合部 2箇所に設置された PTFE (テフロン) 絶縁板とシャント (分路) 抵抗により、約  $10 \text{ m}\Omega$  となるよう設計された。真空シールの信頼性を高めるため、PTFE 絶縁板にはあらかじめ熱間プレスを施し、クリープ変形量を最小とするよう配慮した。また、シャント抵抗は独自に考案・開発したものであり、導電性をもつ SiC 特殊セラミックが抵抗体として用いられている。真空容器には、 $480 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  の開口寸法をもつ水平ポートをはじめとして、大小 122 個に及ぶ多数のポートが設置され、各種プラズマ計測、真空排気、中性粒子入射 (NBI) 加熱などの用途に供されている。図 4. は、真空容器の内部状況を示したものである。真空容

器の内部には、各種磁気プローブ、固定リミター・可動リミター、NBI ピーム用アーマなどの多数の内部品が装着され、内部品の取付用台座の数は 1,100 個余りに達している。

真空容器に要求される高度の超高真空性能、製作精度及び構造的健全性を満たすため、一体成形プレス、局所真空電子ビーム溶接 (EBW)、三次元自動ポート取付溶接などの新工法を開発・適用した。一体成形プレスは、トーラス容器の上下セグメントを全周一体構造として曲げ加工するものであり、適切な素材仕様、金型条件、成形手法によって高精度の D 形容器成形に成功した。局所真空 EBW は、上下セグメントの内外周縫手溶接に適用され、ひずみ量が小さく清浄度の高い溶接施工を実現した。大形容器への局所真空 EBW の適用という点でこの施工は、世界的にも前例のない規模のものである。新たに開発した三次元自動溶接機は、大形ポートの取付けに適用され、信頼性の高い真空バウンダリの形成、ポート部の溶接ひずみの低減、作業効率の向上という面で良好な結果を得た。真空容器の設計・製作を通じて、厳格な品質管理が行われるとともに、各種の研究開発と確性試験により技術的課題の克服が図られた。

#### 2. 1. 4 変流器鉄心

この装置は変流器に鉄心を使用している。その理由は、プラズマと主磁束とのカップリングがよく、プラズマ駆動用の総電力が節約できるためである<sup>(3)</sup>。変流器鉄心に要求される機能は、 $2 \text{ V} \cdot \text{S} (\pm 1 \text{ V} \cdot \text{S})$  の磁束量を持ち、トロイダル磁場コイルの向心力を分担し、支持することである。装置のスペースを狭くできる口形状にし、中心鉄心は  $\phi 900$  の円柱、他の上部鉄心、側部鉄心、下部鉄心は  $900 \times 800$  の角柱で構成し、組立の作業性を考えてこれらの鉄心はバット結合とした。その結果、結合部全体の等価エアギャップが 2 mm となり、残留磁束はほとんど 0 の特性をもっている。また中心鉄心は、トロイダル磁場コイルの向心力、約  $1,000 \text{ t}/\text{コイル}$  の支持構造物でもあるので、実機製作前にモデルによる剛性試験を実施した。

中心鉄心の構造は、厚さ 0.35 mm のけい素鋼板を近似円形にし、エポキシガラスバインドで強固に結合したので、試験によって強度上十分余裕のあることが確認された。鉄心が向心力を支持するためには、トロイダル磁場コイルと中心鉄心を均一に接触させる必要がある。そのため両者共精度の高い機械加工を行い、トロイダル磁場コイルの組立は中心鉄心を模した治具による寸法調整に加え、トロイダル磁場コイルを中心鉄心に与圧を加え押しつける方式を採用した。この与圧は随時、観測できるようにしている。

#### 2. 2 組立、据付け

工場組立と現地組立に関して、下記の課題があった。

- (1) JFT-2 M は既設建屋の制約条件などから、本体をできるだけコンパクトにしており、余裕空間は最小限となっていて組立に工夫を要する。
- (2) 本体設置場所のクレーン容量は 40 t で、他の運搬機械を持ち込むことは困難である。したがって 230 t の本体は分割搬入の必要がある。
- (3) 本体据付け建屋には、種々な装置が据え付けられていて、本体まわりの  $10 \text{ m} \times 15 \text{ m}$  の床面積のみが重量物搬入と仮置きスペースである。
- (4) 上記の条件のもとで、工場組立て 3か月、トーラス搬入後、現地据付け調整 3か月を目標とする。

これらを下記のように解決した。

- (1) 組立空間の検証は、実物大モデルでアクセスした。

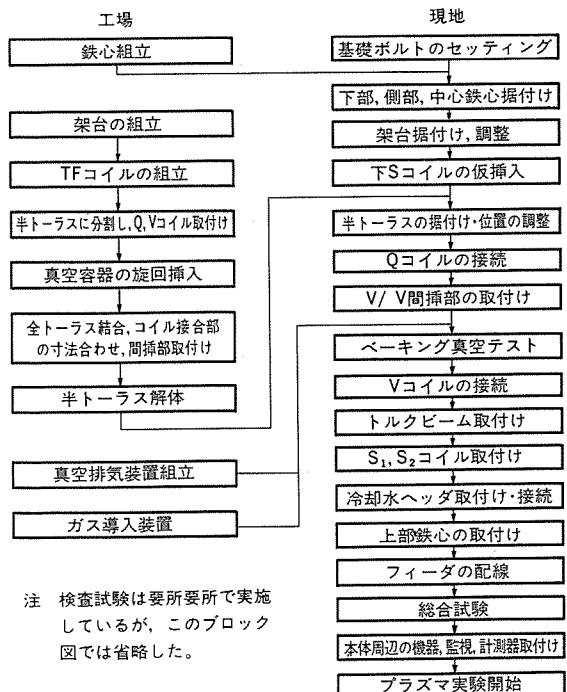


図 5. 本体の組立据付け ブロック図

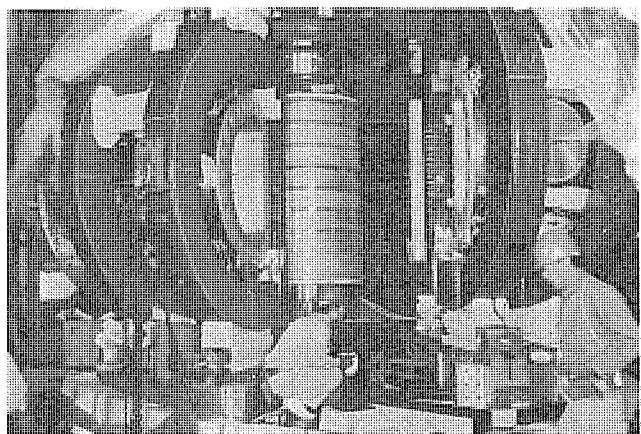


図 6. 半トーラス据付け

- (2) 組立、据付け作業に後戻りがあると、工程上大きなロスになるので、工場総組立から現地据付け完了までの作業を、約250項目にまとめ、中間検査、試験を含めた作業方法と手順を決めた。作業手順は、1/5縮尺モデルで確認された。本体の組立、据付けのあらましの手順を図5に、現地での半トーラス据付けを図6に示す。
- (3) 本体の搬入と据付け作業のスペースはシミュレーションを実施し、作業手順ごとの搬入品目を明確にし、空間の有効利用を図った。
- (4) クレーン容量などの制限により、トーラスを2分割、変流器鉄心を4分割とした。
- (5) 作業手順ごとに1日単位で工程割付けを行い、クリティカルパス作業は、作業方法の改善や並行作業による期間短縮を実施した。

その結果、1981年12月末トーラスを現地搬入し、翌年4月7日に引き渡すことができた。計画どおり据付け試験調整が完了したのは、日本原子力研究所関係者の適切な御指導と御協力によるものである。

### 3. ヘリオトロン DR

ヘリオトロン型核融合装置は、トカマク型にないいくつかの特長を持ち、

トカマク型の対抗機種として研究が盛んである。三菱グループは、京都大学の御指導のもとに、ヘリオトロン磁場における高周波加熱実験用のヘリオトロンDR装置を昭和56年に完成した。装置の設計ポイント、技術開発などについて説明する。

#### 3.1 装置の概要

装置の外観を図7に、主要諸元を表5に示す。装置は次の構成単位からなっている。

- (1) プラズマ閉じ込め用の主磁場を発生するヘリカルコイル
- (2) ヘリカルコイルの垂直磁場を打ち消すための垂直磁場コイル
- (3) プラズマをジュール加熱するためのジュール加熱コイル
- (4) 薄肉真空容器
- (5) 架台

また、将来トロイダル磁場コイルを増設できるよう、架台設計・組立法に関し、配慮されている。コイル導体はすべて中空銅を使用している。以下、主要部品であるヘリカルコイル、コイル給電部について述べる。

#### 3.2 ヘリカルコイル

この装置のヘリカルコイルは、真空容器がベローズ付きの薄肉容器であるため、真空容器に直接巻き付け支持することができず、外側のサポートから支持する方式としたことが特徴の一つである。

ヘリカルコイル自体は、6本の導体からなり、コイルがトロイダル方向に2回転する間にボロイダル方向に15回転して閉じる。精度の良いヘリカル磁場を発生させるために、大半径土1mm、小半径±0.5mmと厳しい寸法精度が設定された。そのため、コイルの製作方法としては、まず1ピッチ分で形成され、ろう付けによって2~3ピッチ

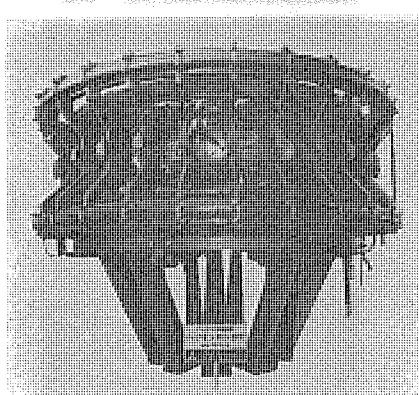


図 7. ヘリオトロン DR 装置の外観

表 5. 定格表

項目	仕様
主半径 (mm)	900
ヘリカルコイル中心磁場 (T)	1
ヘリカルコイル小半径 (mm)	135
ヘリカルコイルターン数 (ターン)	6
ヘリカルコイル電流 (kA)	50
ヘリカルコイル $K$	7.5
垂直磁場コイル数	2
垂直磁場全ターン数 (ターン)	10
ジュール加熱コイル数	10
ジュール加熱全ターン数 (ターン)	18
真空容器	薄肉(2.6mm):ベローズ付き(6箇所)
真空容器材質	インコネル 625

を一体化した。それを絶縁後 6 本の導体を組み合わせ半周分のコイルブロックとした後、半円周の真空容器を回転挿入している。このあと真空容器の溶接、コイルの分割部のろう付け、ポートの溶接を行い、架台との組立を行った。

ヘリカルコイルの精度を確保するため、まずコイルの試作を行い工作

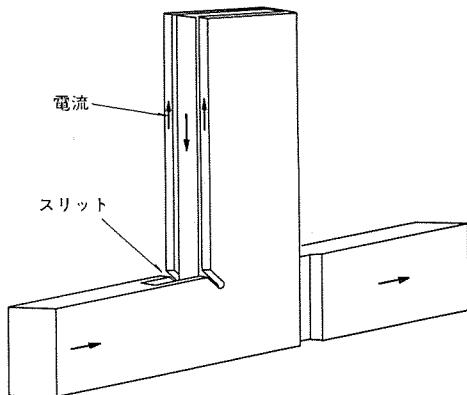


図 8. 給電部の構造

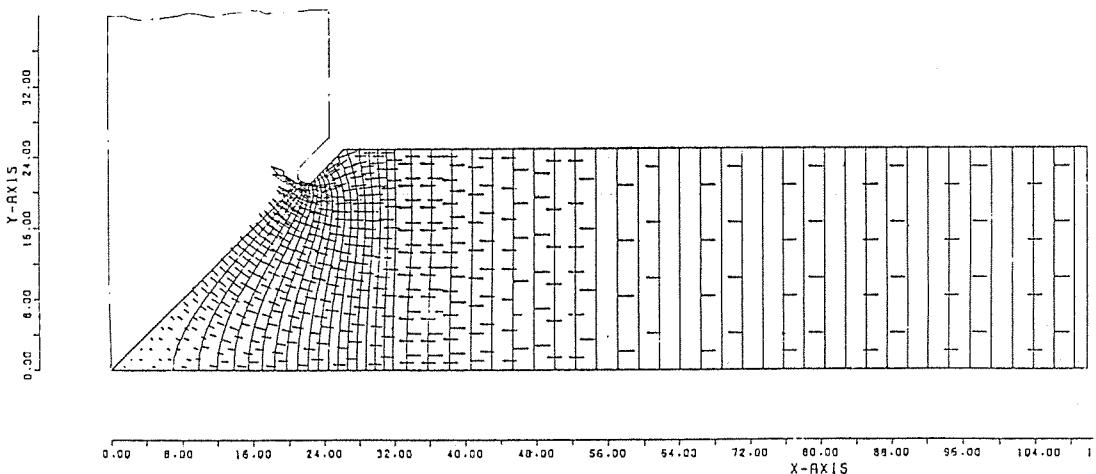


図 9. 電流分布

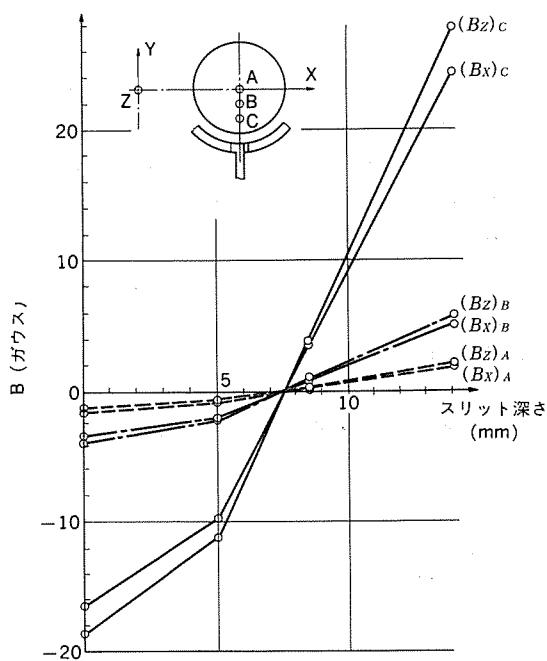


図 10. スリット深さと誤差磁場の関係

法の検証を行った。同時に寸法計測装置を開発し、各工程での寸法管理を行った。この結果、設定された寸法精度に対し、大半径誤差は 0.5 mm 以下、小半径誤差は 0.5 mm 以下と、満足できる精度を得ることができた。

### 3.3 コイル給電部

コイルの寸法精度とともに、磁場精度を良くするためコイルの給電用として新構造を採用した。図 8. にその構造を示す。これはリード部分をサンドイッチ構造としたものに、コーン部分にスリットを設け、電流分布を調整し、誤差磁場を小さくする方法である。図 9. は電流分布の計算例、図 10. はスリット深さと誤差磁場の関係を示したものであり、誤差磁場を小さくする最適深さがあることがわかる。この構造は、すべてのコイルに採用され、全体として非常に誤差磁場の小さい装置とすることができた。

## 4. 逆転磁場型軸対称環状装置 (STP-3 M)

この装置は昭和 58 年 4 月に名古屋大学 プラズマ研究所向け納入した逆転磁場型軸対称トーラス (RFP) であり次の特長をもつ。

(1) プラズマ電流の高密度化…… $1.5 \text{ kA/cm}^2$

(2) 長寿命プラズマの生成……10 ms

(3) 多様な放電波形……広範なプラズマ諸元での実験

図 11. に装置の外観写真を、表 6. に装置の基本諸元を示す。

この装置においてプラズマ内部の磁場はトロイダルコイル印加磁場に対し逆転しているため、小さい閉じ込め磁場で大きいプラズマ電流を流し得る。このため、核

融合実験装置の主流であるトカマク装置と比べて、トロイダルコイルがコンパクト化されており、電源も小規模でよい。更にプラズマ自身が大電流によるジュール発熱で高温化し高価・複雑な追加熱装置が不要であるなど、の理由により装置規模が小さくかつ単純であるという利点を備えており、将来の核融合装置への発展が有力視されている。

この装置のコイルシステムは、ドーナツ形銅製シェル、1 ターンドーナツ形

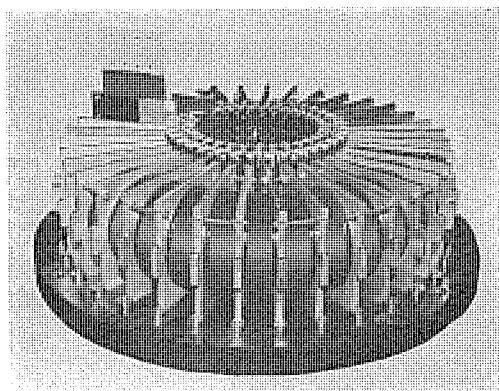


図 11. STP-3M 装置の外観

表 6. STP-3 M 装置の基本諸元

項目	仕様
プラズマ大半径 (cm)	50
プラズマ小半径 (cm)	10
プラズマ電流 (kA)	350
トロイダルコイル磁場 (T)	0.5
ボロイダルコイル起磁力 (kAT)	500

銅製ボロイダルコイル（電流 500 kA）、上下分割形ジュラルミン製トロイダルコイル（36 ターン、電流 35 kA）からなっており、総重量 1,300 kg と軽量コンパクトである。シェル、ボロイダルコイルには FBC 絶縁方式（エポキシコートィング）を採用した。

## 5. 名古屋大学プラズマ研究所 SPAC IV-DR (SPAC-VII)

この装置は名古屋大学プラズマ研究所の構想によるプラズマ実験装置で、2 個のプラズマ環を合体させ、更に高温・高密度化させるというものが、昭和 57 年に製作・納入した。

図 12. に装置の外観写真を、機能概念を図 13. に示す。大電流電子ビームリングで閉じ込めた 2 個のプラズマ環を、圧縮磁場コイルにより径を圧縮し、移送制御磁場コイルにより装置中心側に移送し、合体制御磁場コイルにより両プラズマ環を制御しつつ中央で一体化する。装置の外形は長さ 6.1 m、高さ 3.1 m、真空容積 5 m<sup>3</sup>、重量 34 t のコイル・高真空容器システムである。装置の特長は、  
 (1) コイルの精度が高く（コイル径 1.5 m について約 1 mm）磁場精度が良い。  
 (2) 大口径（直径 1.7 m）の金属製真空シールを使用して高真空を得ている。  
 (3) 軸方向に長いトロイダル磁場コイルに作用するトルクを基礎から支持して装置構造を簡素化している。  
 ことである。

## 6. むすび

以上、最近納入した核融合実験装置の概要について紹介した。これらの装置は、核融合炉を開発する途上に位置づけられ、炉心の研究開発などによって、本体構造、制御、計測方式などが変ぼうしていくものと思われる。今後とも、国内外の研究機関と協力して変化に

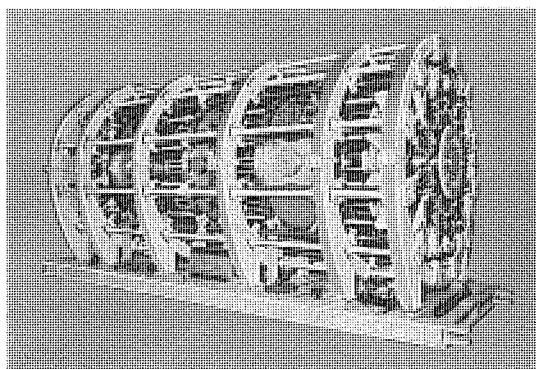
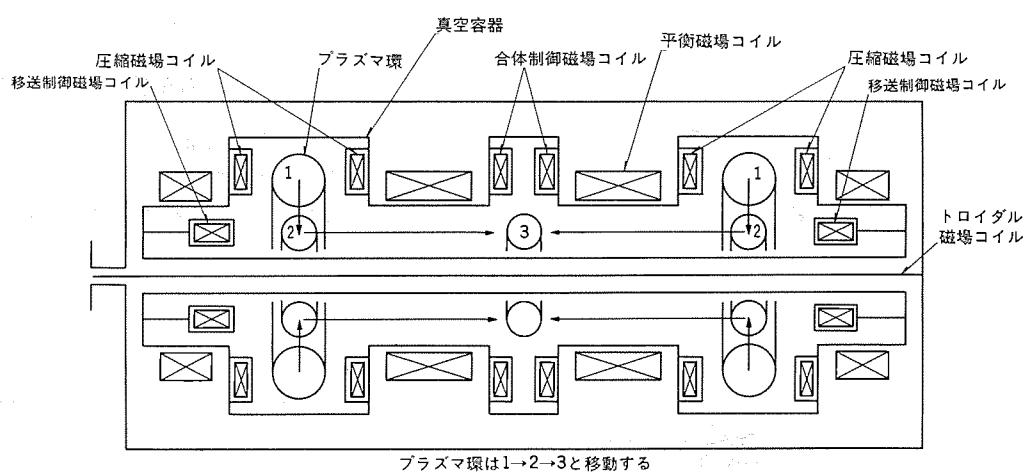


図 12. SPAC-VI-DR 装置の外観



対応した新しい技術を研究開発し、核融合の実現を目指して一層努力するつもりである。

ここに記述した装置は、日本原子力研究所、京都大学、名古屋大学プラズマ研究所の関係各位から多大の御指導を得て完成した。ここに関係者各位に感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- (1) T. SHOJI, A. FUNAHASHI, et al.,: "RESULTS FROM THE JFT-2 M EXPERIMENTS" PROC. OF THE 11TH EUROP. ON CONTROLS FUSION AND PLASMA PHYSICS (ACHEN) VOL. 1 (1983)
- (2) 日本原子力研究所: 核融合開発の現状, 1983 年版
- (3) 嘉本ほか: JFT-2 M における鉄心の効果, JAERI-M 8725 (昭 55)
- (4) 荘司ほか: JFT-2 M 装置の概要—設計、製作、試験—, JAERI-M 83-0194 (昭 58)
- (5) 京都大学ヘリオトロン核融合研究センターパンフレット, 1982 年版

# 超電導マグネット

河村寿三\*・橋本康男\*\*・荻野修\*\*\*・佐藤隆+・丸山佳宏++

## 1. まえがき

昭和36年に、業界に先駆けて当社が超電導の研究を開始したときは、一般には、まだこれが核融合の必ず(須)技術であるという認識は薄かった。しかし超電導が量子力学的現象で、電子が対を作つて抵抗なしに動くとする、いわゆるBCS理論は既に確立しており、電機技術の中でも夢多き先端技術であることは確かであった。その後、この基礎開発と応用研究は年ごとに盛んになり、昨今では特に磁気閉じ込め方式核融合の基幹技術として、各国の研究開発とその成果には目をみはせるものがある。また技術基盤が整備されるに伴つて他分野への波及、すなわち高エネルギー物理学研究設備、磁気浮上鉄道用をはじめとして、超電導発電機、MHD発電機、超電導NMR医用装置、高磁界発生装置、電力貯蔵装置など、急速にその応用が広まりつつある。更に他分野から核融合分野への相互技術波及も盛んである。

核融合技術としての超電導は、基本的には励磁に必要な電力の極小化と高磁界化の手段であるが、今後の課題として、より高磁界化、パルス動作、大形化、ヘリウム冷凍システムとの結びつき、マグネットのシステム化が挙げられる。以下、最近の成果を交えて概論する。

## 2. 大形高磁界マグネット

### 2.1 大形マグネットの特長

核融合マグネットは必然的に大形マグネットを要求する。したがつて、これまでに製作された常電導の大形コイルの電気的機械的な特長、すなわち大電流、高い絶縁耐力、大きな電磁力耐力などの知見はそのまま役立つ。

しかし、超電導であるがゆえに別の面も持つ。すなわち冷媒としてのヘリウムとのかかわり合いと電磁的機械的な面からする安定性の問題である。最近当社が製作した比較的大きな超電導マグネットシステムを通してこの点を論じてみる。一つは現在、高エネルギー物理学研究所(以下、KEKと称す)に設置されているミュオンチャネル超電導ソレノイド<sup>(1)</sup>(図1.)で、長さ6mのソレノイドは超臨界圧ヘリウム(以下、SHEと称す)冷凍となっている。これは大量のヘリウムを必要

とせず、その意味でヘリウム利用率は高い。もう一つは同じくKEKに納入された超電導ベンケイ<sup>(2)</sup>(図2.)で励磁電力極小で大空間に比較的高磁界を得ている。後者は浸し(漬)冷却となっているが、導体及び偏心に起因するコイル全体に作用する電磁力対策が十分施され、クライオ安定性と呼応して極めて信頼性が高い。両方とも実験の手段として、超電導が応用された実用マグネットであるのも大きな特長である。

### 2.2 高磁界マグネットの開発

核融合炉の中でトロイダル磁界コイル(以下、TFCと称す)は、強力な磁気圧を発生させるために高磁界が必要で、この要請にこたえ得る唯一の工業材料がNb<sub>3</sub>Snである。当社は、4.1節に述べる内部拡散法を生かし、かつ高性能化の実現に成功し、このほど12Tスプリットコイル(図3.)を完成した。これは直径100mm程度のスプリット空間に12T磁界が発生でき、大電流導体のクエンチ試験が可能である。

また日本原子力研究所(以下、原研と称す)納めに、Nb<sub>3</sub>Snバンド

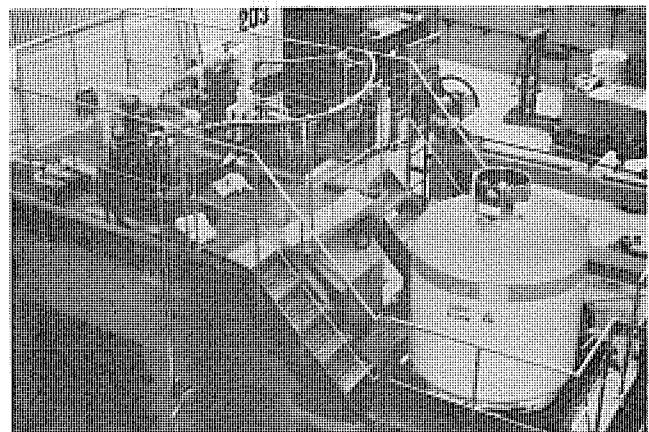


図2. 超電導ベンケイ

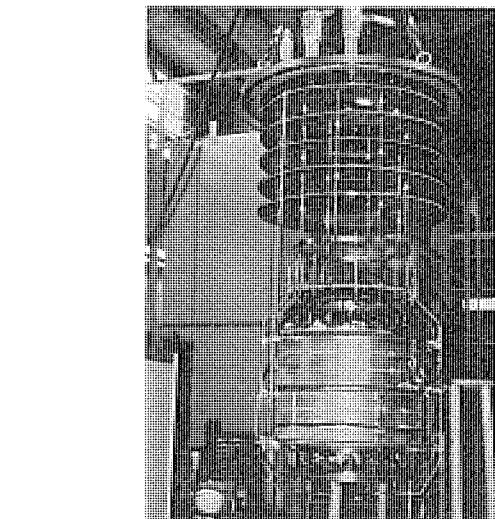


図3. 12Tスプリットコイル

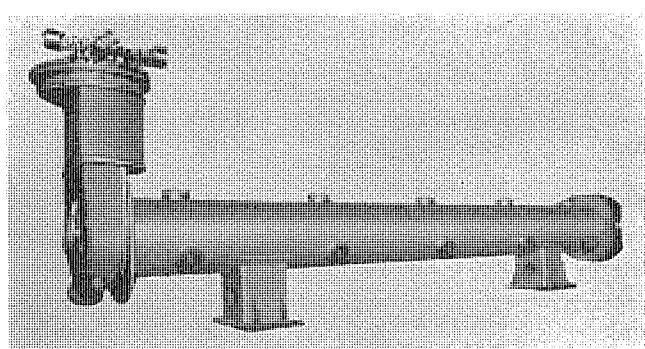
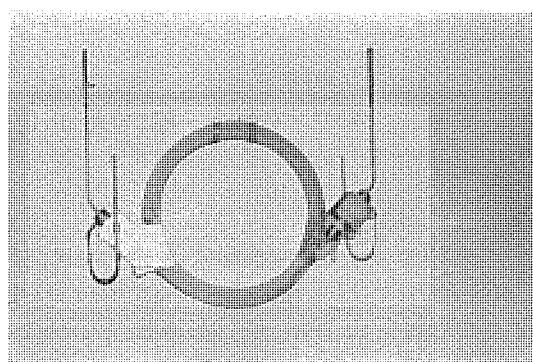
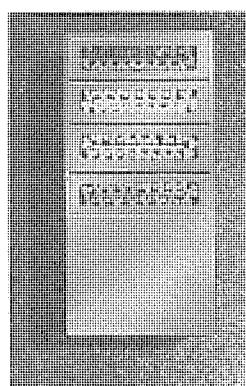


図1. ミュオンチャネル超電導ソレノイド



(a) 外 観



(b) コイル断面

図 4. 原研納め TMC-II R & D テストコイル

ル線材を用いた内部冷却外部支持形導体方式の TMC-II R & D テストコイル(図 4.)を作成し、今後の高磁界大電流 TFC 技術の歩みを更に一步進めることができた。

### 2.3 トロイダル磁界コイルとしての技術課題

#### (1) 高磁界化

TFC に要求される磁界は 12 T 以上であり、当社は 4.1 節に述べるよう、Nb<sub>3</sub>Sn の高性能化と取り組んでいます。

#### (2) コイル冷却方式

TFC の冷却方式には浸漬冷却と強制冷却 (SHE, 二相流ヘリウム、超流動ヘリウムなど) がある。どの方式を選択するかは、コイル安定性、交流損、コイルの機械的強度、冷凍系信頼性、コストとの兼合いで決めるべきであるが、現状ではどちらか一方が有利であると決定できるほど研究開発は進んでいない。前述の TMC-II R & D テストコイルはこれら研究開発の一つである。

#### (3) 電磁力支持構造

大形 TFC の最大の問題の一つで、考えられる方式には以下のものがある。

(a) 導体自体の強度向上のため半硬安定化銅とする：原研納め CTC (クラスタテストコイル) に採用した方式で、日本と米国 GD 社の LCT (大形コイル) の銅母材 ソルダ方式複合線にも使用されていく。この導体による巻線には電磁力支持用コイル容器が必要である。

(b) コイル容器材料：材料そのものの強度向上も一つの方法で、日本 LCT には SUS 304 LN が採用された。

(c) 外部支持導体方式：原研納め パルサ E, JB-50 にも採用された方式で、浸漬冷却にも強制冷却にも適用可能である。外部支持

表 1. 超電導パルスマグネット 製作経歴

名 称	仕 様				納入先(略称)	製 造 年
	巻線内径、外径、長さ	最 大 磁 界	エ ネ ル ギ ー	超 電 導 線		
78 kJ パルスマグネット	112, 226, 94 mm × 2	6.4 T <sup>(1)</sup>	78 kJ	NbTi-Cu モノリスの コンパクトケーブル	電総研	1979
402 kJ パルスマグネット	220, 399, 345	6.4 T <sup>(2)</sup>	402 kJ	NbTi-Cu-CuNi モノリスの コンパクトケーブル	同 上	1980
エネルギー貯蔵用 シールドマグネット	525, 673, 74	3 T	115 kJ	NbTi-Cu モノリス	KEK	1981
外部支持形 10 kA パルスコイル	200 (7 T バイアス磁界中)	—	—	CuNi 外皮付き NbTi モノリスの ケーブル	原 研	1981
平行パルス磁界 発生用コイル (パルサ B)	80, 140, 52 × 8 コイル トーラス中心径 290 <sup>(3)</sup>	3 T	13 kJ	NbTi-Cu-CuNi モノリスの コンパクトケーブル	同 上	1981
515 kJ パルスマグネット	310, 494, 255	6.1 T	515 kJ	NbTi-Cu-CuNi モノリスの コンパクトケーブル	阪大(工)	1981
200 T/s パルスマグネット (RPC-I)	190, 468, 414	3.84 T (パルス) 6.3 T (DC)	170 kJ (パルス) 470 kJ (DC)	NbTi-Cu-CuNi モノリスの三重ケーブル	名大プラ ズマ研	1982
外部支持形 10 kA パルスコイル (パルサ E)	200, 405, 398	7 T (バイアス磁界共)	27 kJ (単独)	NbTi-Cu-CuNi モノリスの二重ケーブル	原 研	1982
200 T/s パルスマグネット (RPC-II)	190, 431, 472	3.74 T (パルス)	154 kJ (パルス)	RPC-I- と同一導体	名大プラ ズマ研	1983
外部支持形 30 kA パルスコイル (JB-50)	500, 780, 150	7 T (バイアス磁界共)	45 kJ (単独)	NbTi-Cu-CuNi モノリスの三重ケーブル	原 研	1983

注 (1) 6.4 T/1.5 s 運転、(2) 6.4 T/4 s 運転、(3) トロイダルコイル配置

体同志の溶接、又は樹脂含浸によってコイル容器を不要にするこ  
とも可能で設計の融通性が高い。

(d) ディスク方式：動力炉及び実験炉の概念設計において当社の  
提案したもので、ステンレス鋼（以下、SUSと称す）ディスクなどに  
溝を設けて導体を埋め込む方式である。

#### (4) 交流損

TFC自体にはパルス電流を流さないが、ポロイダル磁界コイル（以下、  
PFCと称す）からのパルス磁界で印加されるので、巻線及びコイル容  
器の交流損対策が必要である。

### 3. パルスマグネット

#### 3.1 パルスマグネットの開発

超電導パルスマグネットの適用分野は、核融合、シンクロトロン、SMES（超  
電導磁気エネルギー貯蔵）であるが、ここでは核融合用に限定して述べる。

核融合PFCの研究開発は、我が国は最も盛んといってよく、原  
研、電子総合研究所（電総研）、名古屋大学（名大）、大阪大学（阪  
大）、KEKなどの意欲的な活動に当社も微力を尽くすことができ  
た。当社製作パルスマグネットのリストを表1.に示す。

#### 3.2 ポロイダル磁界コイルとしての技術課題

##### (1) 高速パルスコイル

最近のトカマク装置の開発の顕著な傾向は、中規模トカマクの超電導化である。既に建設されたものとして、仏国のTore Supraがあり、検討中のものにAlcator DCT、名大プラズマ研究所のRトカマク、原研の中規模トカマクがある。これらの共通の特色はロングパルスであり、PFCを超電導化することにより初めて実現可能となる。このうち、超電導Rトカマクは最初に100～200 T/sという高速パルス化を提案した装置である。

この高速パルスコイルの科学的技術的可能性を実証するため、名大・  
日本大学・電総研・三菱電機による共同研究を昭和55年から行  
ってきた。この共同研究の成果の第一段階が表1.の中のRPC-I<sup>(3)</sup>  
及びRPC-IIである。このコイルに採用している超電導線は、図5.  
及び表2.に示すような構成のもので、高速パルス磁界中で低損失  
特性を得ることができた。RPC-IIコイルのパルス運転実験では、コイ

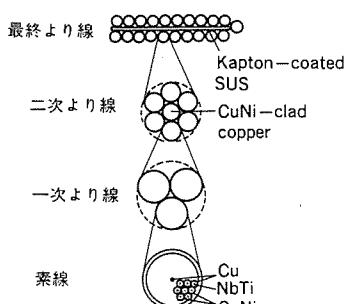


図5. RPC用超電導線

表2. RPC用超電導線

諸元	数値
外径 (mm)	0.35
フィラメント径 (μm)	6.3
フィラメント数	760
ツイストピッチ (mm)	5.8
CuNiシース径 (μm)	15
NbTi : Cu : CuNi 比	1 : 2 : 1.6

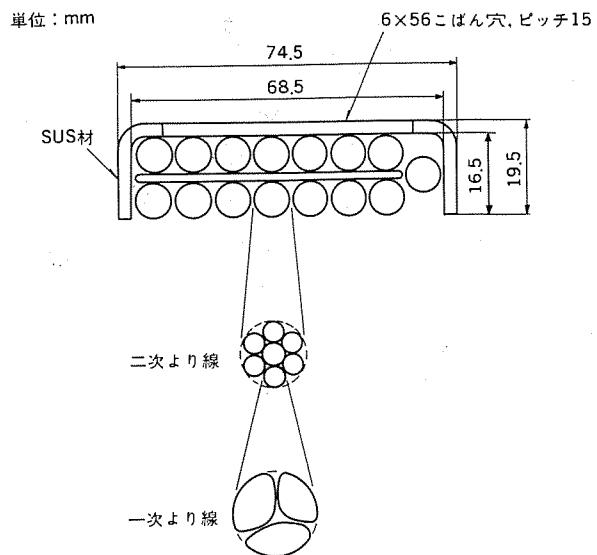


図6. JB-50パルス導体

ル印加電圧 7.62 kV、パルス電流 4,260 A（ピーク値）、コイル最大磁界 3.74 T のパルス励磁に成功した。このときの平均磁界変化率（立上げ）は、3.74 T/18.7 ms=200 T/s、最大磁界変化率は 314 T/s である。今後の実験計画の一つとしてロングパルス運転がある。

##### (2) 大電流高強度パルスコイル

大電流容量かつ高機械的強度のパルス導体及びコイルの開発は、原研によつて組織的に進められており、当社は表1.の外部支持形 10 kA、30 kA パルスコイル、並びに 50 kA パルス導体の製作で協力した。JB-50 パルス導体の構成を図6.に示す。導体の特色は、超電導素線からなる、より（撲）線の外部に補強用 SUS 支持材を設けていることである。これは将来の大形 PFC の電磁力保持に必須の導体方式と考えられる。この導体は浸漬冷却用であるが、強制冷却用への適用は容易である。10 kA パルスコイル（パルサE）の原研における試験の結果、定格を大きく超える 15.4 kA までパルス励磁が可能で、この方式の妥当性が確認された。パルスコイルの疲労強度の問題が今後重要なよう。

##### (3) コイル冷却方式

TFCの項で述べたように2方式があり、浸漬冷却方式の場合、渦電流損をなくすFRPデュウの開発が重要である（4.2節に記述）。強制冷却方式ではコイルの機械的強度は有利であるが、コイル安定性、クエンチ時圧力上昇、導体接続などに解決すべき問題がある。なお、パルスコイルには間欠的熱発生を伴うので、これの吸収可能な高性能ヘリウム冷凍機の開発も必要である。

### 4. マグネット材料の開発

#### 4.1 超電導材料及び導体の開発

現在実用化されている超電導材料には、低磁界用のNbTi系合金と高磁界用のNb<sub>3</sub>Sn系化合物があり、当社ではこれらの線材の開発と製造を行っている<sup>(4)</sup>。NbTi系線材では、加工と熱処理を最適化することにより、8 T で  $1.3 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> と非常に高い臨界電流密度 (J<sub>c</sub>) を持つ線材を開発した。更に、Ti組成の高い線材に高純度アルミを押し出し複合化することによって、衝突粒子検出用マグネットに適用可能な、優れた粒子透過性を持つ導体も開発した。また、当社が世界に先駆けて開発したNbTiTa合金は4.2 K以下の高磁界特性が非常に優れており、超流動He冷凍による高磁界マグネット用線

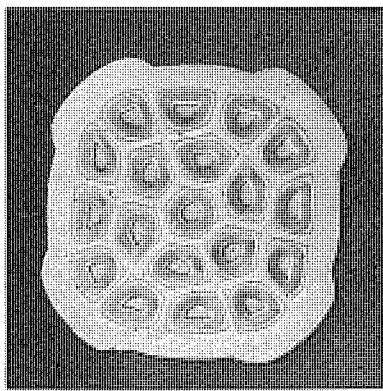


図 7. TMC-II R & D テストコイル  
の素線 (反応前)

材として注目されている。このほかに、パルスマグネット用には、断面構成を NbTi フィラメントと安定化 Cu と高抵抗 CuNi 合金の三層構造とした素線を多数撚り合わせ、更に SUS の補強材と組み合わせた導体も開発した。

NbSn 線材の製造は、当社が独自に開発した内部拡散プロセスによって行っている。この方法は、構成成分の Nb, Sn, Cu を単体で複合加工するので、Nb と CuSn 合金を用いる従来のブロンズ法に比べ、 $J_c$  が高い、プロセスが簡単で信頼性が高い、低コストであるなどの特長をもっている。最近、NbSn に第三元素として In や Ti を添加することによって高磁界  $J_c$  の改善を行い、10 T で  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>、12 T で  $5.3 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> という非常に高い値を達成した。このような独自の技術で製造された Nb<sub>3</sub>Sn 導体は、30 MVA 超電導同期調相機<sup>(5)</sup>や、前述の 12 T スプリットコイル、TFC 対応強制冷却モデルコイルなどに適用されている。図 7. に導体の、図 8. に特性の例を示す。

TFC や PFC のような大形マグネットでは大電流容量が要求され、多くは複合導体の形で使用される。当社ではモノリス 導体のほかに、成形撚線導体、モノリスあるいは成形撚線をはんだで Cu シースに埋設した導体、SUS 角管内に撚線を収納したバンドル導体などの製造開発を行い、マグネットの大形化を指向している。

#### 4. 2 FRP デュウの開発

超電導マグネットのパルス動作への要求が過酷となるに従い、その極低温容器への要求、特に非導電性、低熱伝導性が高まる。FRP デュウのニードはここから生まれ、各社とも FRP 複合材料製デュウの研究開発が活発である。当社では変性系樹脂を使用して一体成形方式の FRP デュウを開発して阪大・超電導工学実験センターに納入した。

FRP デュウは金属デュウに比べて次の特長をもっている。

- (1) 非導電性で渦電流を生ぜず、したがって交流損がない。
- (2) 熱伝導率が小さい。
- (3) 液体窒素の使用を省略できる。
- (4) 軽量で比強度・比剛性が高い。
- (5) 低コストが可能。

このような特長を生かすには、FRP 材料の選定・成形方法が重要で、特に以下の点に留意して開発を行った。

- (1) 極低温域でクラックの発生のないこと。
- (2) 特に真空部へのアウトガス、ヘリウム透過性が極小なこと。
- (3) 成形後残存気泡率の少ないこと。
- (4) 樹脂リッチが発生しない成形法とすること。
- (5) その他作業性のよいこと。

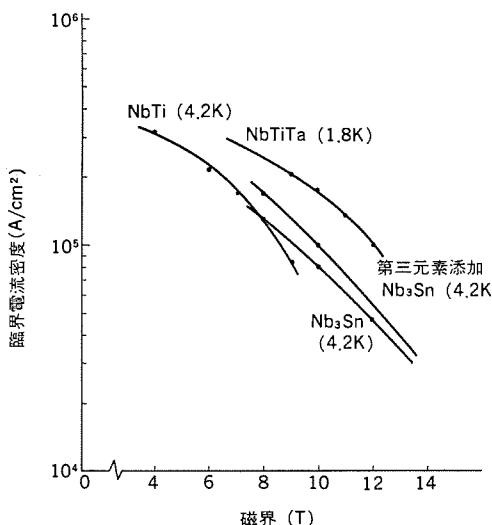


図 8. 超電導線材の磁界-臨界電流特性

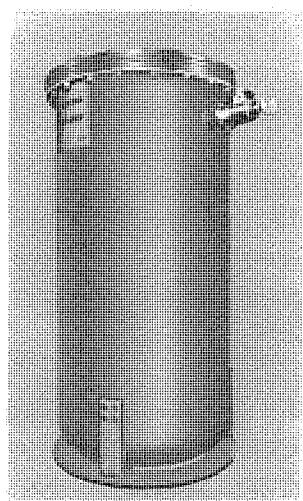


図 9. 開発された FRP デュウ

表 3. デュウ材料測定結果

項目	測定結果
ヘリウム透過量 (atm·cm <sup>2</sup> /Torr·s)	$2.4 \times 10^{-11}$
アウトガス量 (Torr·l/cm <sup>2</sup> ·s)	$1.1 \times 10^{-7}$
気泡残存率 (重量比) (%)	0.1
織維含有率 (%) (%)	74
サーマルショック	クラック発生なし (LN <sub>2</sub> 浸漬 50回)
織弹性率 80°C/-150°C (kgf/mm <sup>2</sup> )	2,000/2,600
曲げ弾性率 (")	2,230/2,500
引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	25/33
曲げ強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	32/46
線膨脹率	$14.5 \times 10^{-6}/9.9 \times 10^{-6}$
熱伝導率 (W/cm·K)	$4.0 \times 10^{-3}$

上に示す規準に従って、オートクレーブ成形法によって作られた試料の特性を表 3. に、また完成した FRP デュウの外観を図 9. に示す。

#### 5. ヘリウム冷凍システム

##### 5. 1 ヘリウム冷凍システムの開発

現在活発に推進されている概念設計によれば、超電導 TFC 及び PFC の極低温構造部材の重量は、実験炉規模で数千トンに達する超大形コイルシステムである。これを極低温に冷却保持するヘリウム冷凍システム及びその周辺の主な技術課題は次のようになる。

- (1) 大容量のヘリウム液化・冷凍能力
- (2) 大形構造物の冷却時熱収縮応力の緩和
- (3) 急速な PFC 磁界変動による熱負荷増大
- (4) 冷凍システム運転の信頼性向上
- (5) 冷凍運転の自動化と保護監視システムの確立
- (6) 冷凍効率向上による所要電力量の低減
- (7) 低温ヘリウムの大量分配供給と完全回収

現在に開発された世界最大のヘリウム冷凍システムは、米国フェルミ国立加速器研究所の Tevatron 陽子シンクロトロンに建設された 4,875 l/h 機である<sup>(6)</sup>。この液化装置は 4.6 K における冷凍能力に換算して 12 kW であるから、将来の実験炉で必要とされる 10 ~ 30 kW 級とほぼ同規模の大容量機が実用されることになる。我が国では原研に 350 l/h のヘリウム冷凍システムが設置され、システムの高効率化と信頼性の向上に重点をおいた開発が行われた<sup>(7)</sup>。当社でも昭和 54 年に大形超電導マグネットの冷却実験設備として 100 l/h 機を設置し、超電導マグネットと組み合わせてヘリウム冷凍システムの技術開発を行っている。既に原研納め CTC、東京大学納め ミュオンチャネル超電

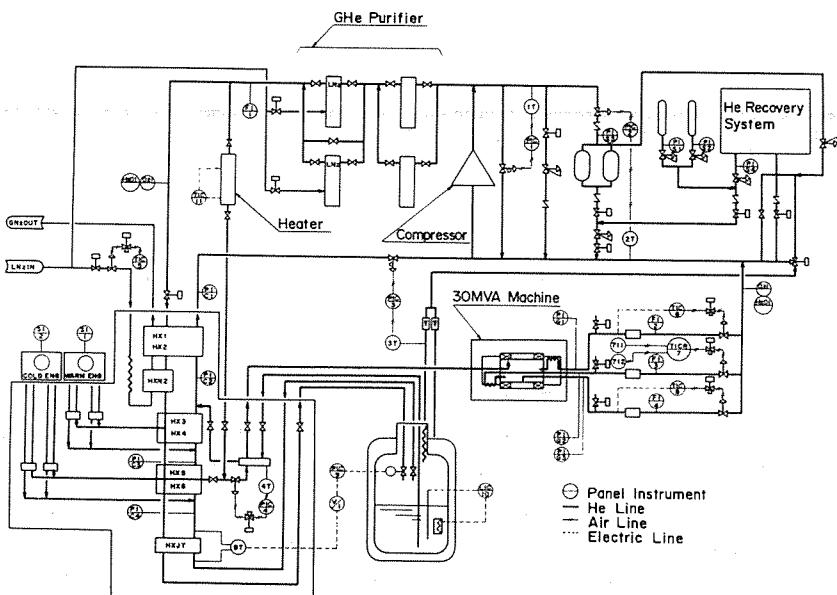


図 10. 超電導同期調相機のヘリウム冷凍システムフロー

導ソレノイド, KEK 納め超電導ベンケイ, 阪大納め 0.5 MJ パルスコイルなどの冷却励磁試験を行い, 大形コイルの冷凍技術の基礎とすることことができた。

## 5.2 冷凍システムの冷却運転

超電導マグネット系の冷却運転に対する信頼性は, ヘリウム液化冷凍装置, 回収装置, 精製装置などの個々の構成機器の信頼性のほかに, 超電導マグネットとその低温装置(クライオスタット又はデュウ)を含めたヘリウム冷凍システム全体の構成と運転制御によって大きく支配される。また, 核融合のようにシステムが拡大し複雑化すると, 冷却運転にはコンピュータ制御が必要である。

当社におけるヘリウム冷凍システムの自動運転技術の進歩は 30 MV A 超電導同期調相機の冷却運転に見ることができる。図 10. は冷凍システムのフローチャートである<sup>(8)</sup>。このシステムは液化能力 30 l/h の比較的小容量機であるが, システムの構成や冷却運転に対する信頼性などの基本となる技術は大形冷凍システムに共通するものであり, その実用成績は前述の 100 l/h 機の計測自動化にも反映させた。

## 5.3 超臨界圧ヘリウム冷凍

超電導マグネットの冷却方式は, 液体ヘリウム浸漬冷却と SHE 流動冷却が代表的であるが, それぞれ一長一短があるため, ここ数年は両方式並行してマグネットとともに開発が続けられよう。特に PFC はヘリウムの貯留量が少なく, 気泡停滞の懸念のない SHE 冷却が有望である。SHE は臨界圧力 2.25 atm 以上に圧縮された極低温ヘリウムガスで, 比熱が大きくかつ粘性係数が小さいので, 細長い流路断面をもつ超電導導体の冷却に適している。

SHE 流体の発生方式は, 低温ポンプ方式と常温圧縮機方式の 2 方式がある。現在のところ, 10/3 atm 程度の圧縮比で大流量の低温ポンプの開発が進められているが, まだ実用段階に達していないために, 後者が実用されている。当社では核融合超電導マグネットに SHE 冷却を採用すべく, ①冷却に適した SHE 流動条件の設定, ②並列コイルの冷凍制御, ③パルス励磁時の発生熱除去などの検討課題と必要技術の開発を行っており, SHE 冷凍システムの設計及び基本ループ

の試作試験を行った。また, SHE 冷凍の安定性は前述のミュオンチャネル超電導ソレノイドの間接冷却において実証されており, 現在までに 8,000 h を越える運転実績が得られている。

## 6. む す び

磁気閉じ込め式核融合に不可欠とされる超電導技術につき概説した。その要点は,

- (1) Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線の, より高性能化, より高度な複合化, 更に別な材料構造を持つ高磁界材料の創出
- (2) 大電流で交流損失少なく超電導安定性の高いパルス導体の開発
- (3) 核融合炉に適したヘリウム冷凍システムの開発
- (4) 上述の事項を総合し, 更に大形マグネット技術として構造面の考慮を十分払ったマグネットシステムの開発

に尽きるものと考えられる。

これらの技術開発は, 将来の核エネルギー獲得の手段として不可欠なものであり, その中にあって当社の役割を十分認識して開発推進に努めたい。終りに超電導マグネットの開発について御指導いただいている各研究機関の関係各位に対し, 心から謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) T. Satow, et al. : Manufacture of a 6-m superconducting solenoid indirectly cooled by supercritical helium. *Adv. Cryog. Eng.* 27 p. 109 (1982)
- (2) T. Inagaki, et al. : Large aperture superconducting magnet (BENKEI). *Proc. ICEC 9* p. 505 (1982)
- (3) H. Momota, et al. : Superconducting poloidal coils for the Reacting Plasma Project II. Performance test of a model coil under a 200 T/sec pulsing rate. *Proc. ICEC 9* p. 454 (1982)
- (4) 吉崎ほか: 超電導材料, 三菱電機技報 56. No. 2 p. 123 (昭 57)
- (5) T. Yamada, et al. : Nb<sub>3</sub>Sn/NbTi superconducting windings for 30 MVA synchronous rotary condenser. *IEEE Trans. Magn. MAG-17* No. 5 p. 2194 (1981)
- (6) W. M. Toscano, et al. : Thermodynamic and mechanical design of the FNAL central helium liquefier. *Adv. Cryog. Eng.* 23 (1977)
- (7) E. Tada, et al. : 350-l/h, 1,200-W helium cryogenic System for the development of fusion technology. *Proc. ICEC 9* p. 93 (1982)
- (8) H. Yoshimura, et al. : Development and test of a helium refrigeration system for a 30 MAV superconducting synchronous condenser. Presented at CEC (1983)

## 1. まえがき

高周波電力によるプラズマ加熱が、核融合の研究開発において、年々ますます重要性を増してきた。当社では、京都大学ヘリオトロン核融合研究センターにヘリオトロンEの高周波加熱用装置(ECH装置及びICRF装置)を開発して納入したのをはじめ、日本原子力研究所や諸大学の指導を得て、各種の装置の開発を進めている。

高周波によるプラズマ加熱は、ECH(Electron Cyclotron Heating), LHH(Lower Hybrid Heating), ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency)の三つの方式があることが知られている。これらはいずれもプラズマ加熱の研究成果を上げて、将来の核融合炉実現の見通しを勇気づけている。表1.はこれら的方式の特長と当社の主な実績を示したものである。

以下に、ICRFとECHについて、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター納めのICRF装置とECH装置の構成や性能の概要を中心に述べ、更に日本原子力研究所納めのICRF・リッジ導波管結合器について述べる。

## 2. ICRF 装 置

ICRF装置は発振管によらず製作出来ることから、研究の歴史も比較的古く、研究進度に合わせて出力増大の要請が高い。当社では単

基1.5 MW出力という世界屈指の大形装置を開発し、京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに納入した実績をもっている。これを中心述べる。

## 2.1 概 要

この装置はピーク出力1.5 MW、パルス幅10 ms(200 msに増強中)、デューティ1/1,000という大電力高周波増幅器で、動作周波数は17.8~26.7 MHzである。負荷変動の激しいプラズマ加熱において、安定した動作を得るために増幅回路方式と終段増幅管の選定が重要で、種々検討しアンプチェーンとしてグリッド接地方式の同調増幅回路を採用した。

このため基準信号発生器出力0 dBmより1.5 MWまでの増幅91.8 dBを、複数段の半導体増幅器と3段の真空管増幅器をカスケード接続している。終段増幅管は、トムソンCSF製TH-518で、増幅器は集中定数素子の全くないキャビティである。制御系や保護回路系に、大幅に基板回路を採用して、コンパクト化を図るとともに、信頼性を向上させた。また、各増幅器を二重シールドして、不要RFふく射を低く抑えることに成功した。終段増幅器出力1.5 MWは同軸給電線(WX-152 D)約60 mを経てインピーダンス整合器を通り、ヘリオトロンEに伝送される。図1. (a), (b)は、この装置のアンプチェーンの外観である。

表 1. 高周波加熱装置の特長と製作実績

	特 長	納 入 先	適 用 装 置	仕 様 な ど	納 入
ECH	電子共鳴の作用で、プラズマ中の電子を選択的に加熱する。 周波数 20~140 GHz 発振源 ジャイロトロン	京都大学ヘリオトロン核融合研究センター	ヘリオトロン DR	28 GHz, 200 kW, 40 ms (パリアン社 ジャイロトロン VGA-8050A)	昭 57
			ヘリオトロン E	53 GHz, 200 kW×5, 100 ms (パリアン社 ジャイロトロン VGE-8053)	昭 58~59 (一部製作中)
		京都大学理学部	WT-II	36 GHz, 50 kW, 10 ms (NEC社 ジャイロトロン LD 4771)	昭 56
		大阪大学溶接工学研究所		60 GHz, 200 kW, 40 ms (パリアン社 ジャイロトロン VGE-8060)	昭 57
		日本原子力研究所	JFT-2 M	60 GHz, 200 kW, 100 ms (パリアン社 ジャイロトロン VGE-8060)	昭 59 (製作中)
LHH	プラズマ中の電子とイオンの両者を同時に加熱する。 周波数 0.6~2.2 GHz 発振源 クライストロン, マグネットロン	京都大学理学部	WT-II	915 MHz, 100 kW, 20 ms (JRC社 マグネットロン)	昭 55
ICRF	イオン共鳴の作用で、プラズマ中のイオンを選択的に加熱する。 周波数 10~130 MHz 発振源 板極管による増幅	京都大学ヘリオトロン核融合研究センター	ヘリオトロン E	17.8/26.7/53.4 MHz, 1.5 MW, 10 ms/200 ms	昭 58~昭 59
		日本原子力研究所	JFT-2 M	リッジ導波管結合器 38 MHz	昭 58

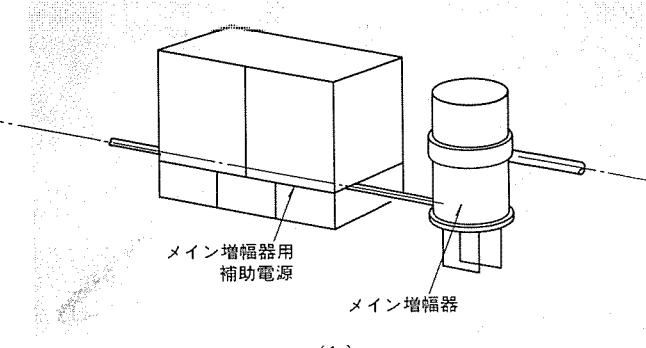
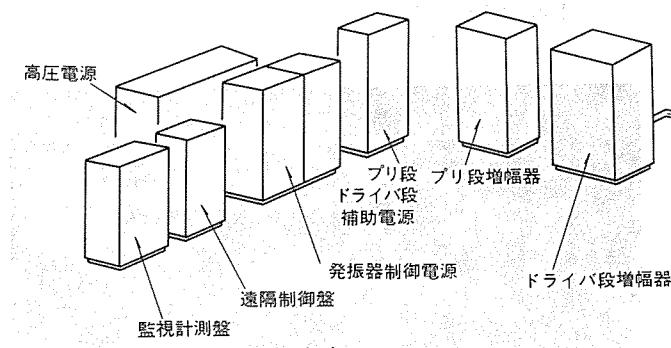
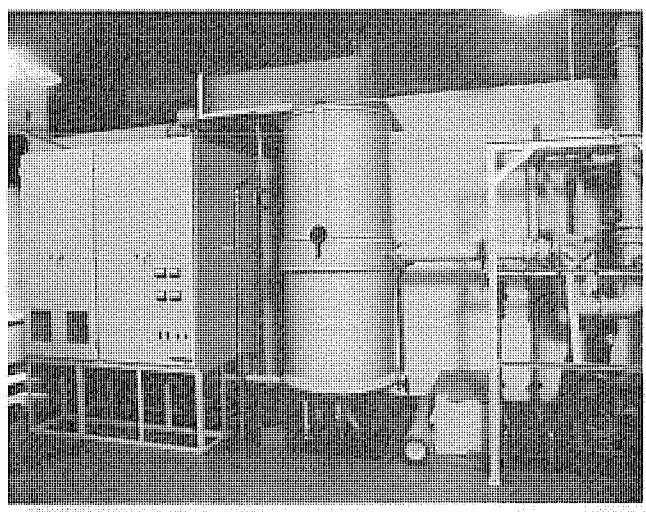
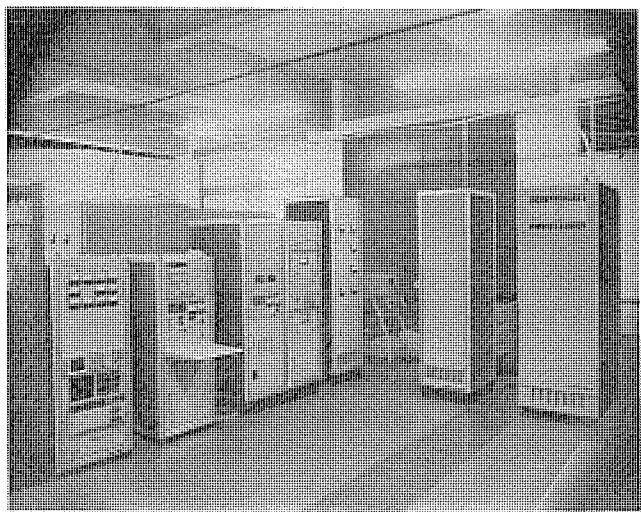


図 1. ICRF 高周波加熱装置

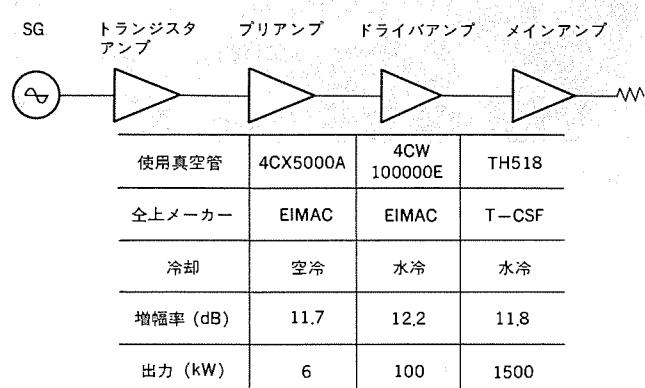
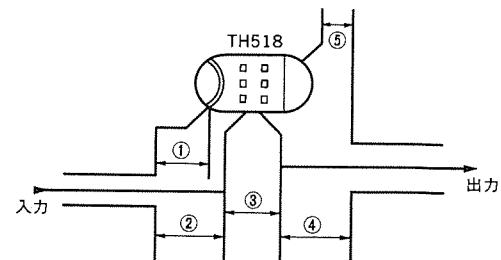


図 2. アンプチェーン



- ①: 入力整合回路
- ②: 入力同調回路
- ③: 中和回路
- ④: 出力整合回路
- ⑤: 出力同調回路

図 3. ICRF 装置 メインアンプ

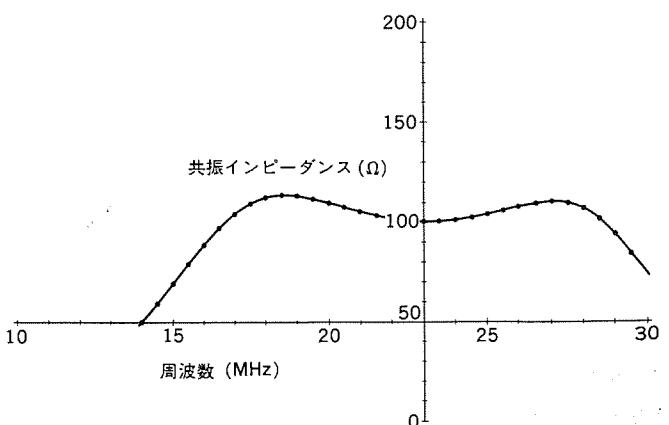


図 4. ICRF 装置 メインアンプ 周波数特性

## 2. 2 構成

この装置は増幅器と伝送部に大別される。増幅部はメインアンプ、ドライバアンプ、ブリアンプ、高圧電源、補助電源(I)・(II)、発振器制御電源及び遠隔制御盤、監視計測盤の9ユニットから構成されている。図2.はアンプチェーンと諸元である。

伝送部は、整合器、負荷と増幅器とを直列的に絶縁するDCカット、方向性結合器、SF<sub>6</sub>ガス加圧装置と伝送ラインである。この伝送ラインは同軸給電線WX-152Dを、整合器以降アンテナ負荷まではWX-203Dを使用し、いずれも給電線支持構造物からAC 10kV耐圧で絶縁している。これら伝送ラインはSF<sub>6</sub>ガス1kg/cm<sup>2</sup>Gまで加圧できるよう構成されている。また試験用の各種ダミーロードを備えている。

### (1) メインアンプ

メインアンプは、四極管TH-518及び広帯域キャビティからなる。基本

表 2. ICRF 装置主要性能

動作周波数	17.8 MHz	26.7 MHz
出力 (MW)	1.5 以上	
パルス幅 (ms)	0~10	
ディテイ	1/1,000	
出力サグ (%)	14	16
出力高調波成分 (dB)	-22 以上	-24 以上
出力立ち上り時間 (μs)	8	2
立下り (μs)	7	3
RF 出力遮断時間 (μs)	6 以下	
クローバ動作時間 (μs)	8 以下	
漏えい電界強度 (mV/m)	5 (終段増幅器より 3 m の点)	

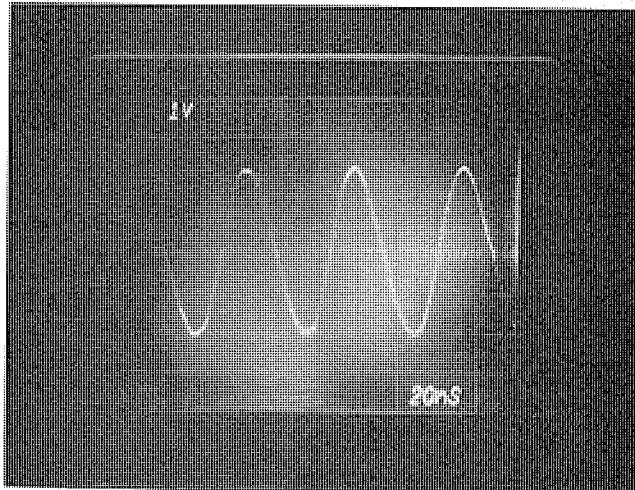


図 5. ICRF 装置出力波形 (周波数 17.8 MHz, 出力 1.5 MW)

的構成を図 3. に示す。集中定数素子を全く使用せず 17~27 MHz までの広帯域特性をもち、パワーゲイン差は実測値 0.5 dB 以内である (図 4.)。一部の部品を交換すれば、53.4 MHz, 1.5 MW 出力が可能である。

#### (2) ドライバアンプ、プリアンプ

ドライバアンプは EIMAC 製 4 CW 100000 E を使用した LC 同調増幅器、プリアンプは EIMAC 製 4 CX 5000 A を使用した同様の増幅器である。ドライバアンプのアノード電源は、メインアンプと共にシステムの合理化を行っている。また、出力に含まれる高調波成分低減のため、接続の同軸給電線にトラップを設けている。

#### 2.3 装置の性能

1.5 MW という国内はもとより世界でも第 1 級の出力を得るのに、多くの問題とその解決に多大の労を要したが、得られた性能は仕様を十分上回り表 2. のとおりである。図 5.~図 7. はその出力特性の一部で、図 7. は外部信号入力による AM 变調出力波形である。

#### 3. ECH 装置

ECH はプラズマ研究の当初から、加熱方式として有力な手段である、と考えられていたが、ミリ波大電力発振管が開発できないため研究着手が遅れていた。

しかし米国 バリアン社でジャイロトロンと

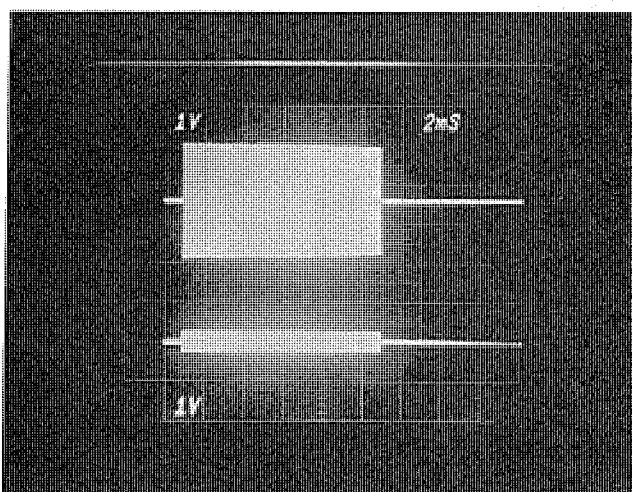


図 6. ICRF 装置出力パルス波形 (周波数 26.7 MHz, 出力 1.5 MW) (上: 出力, 下: 反射)

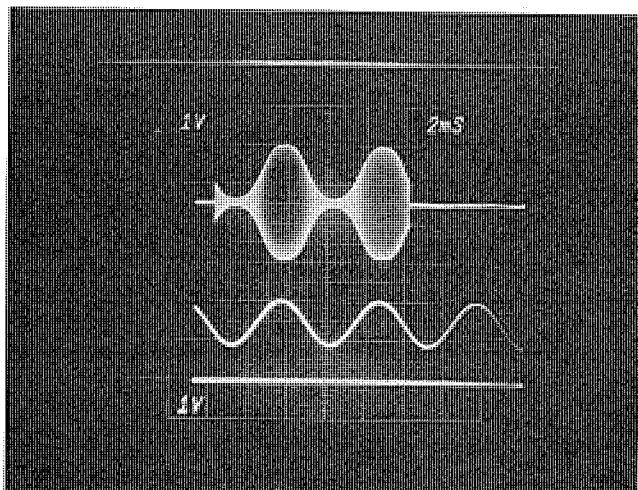


図 7. ICRF 装置 AM 变调出力パルス波形 (周波数 26.7 MHz, 出力 1.5 MW AM 变调) (上: 出力, 下: 变调信号入力)

いうミリ波大電力発振管が開発されて以来、急速に活発となり多くの研究成果が得られている。当社では早くから ECH の重要性に着目して、ジャイロトロン駆動電源の開発を進め、現在までに国内に設置されたものはほとんど当社が製作している。このうち京都大学ヘリ

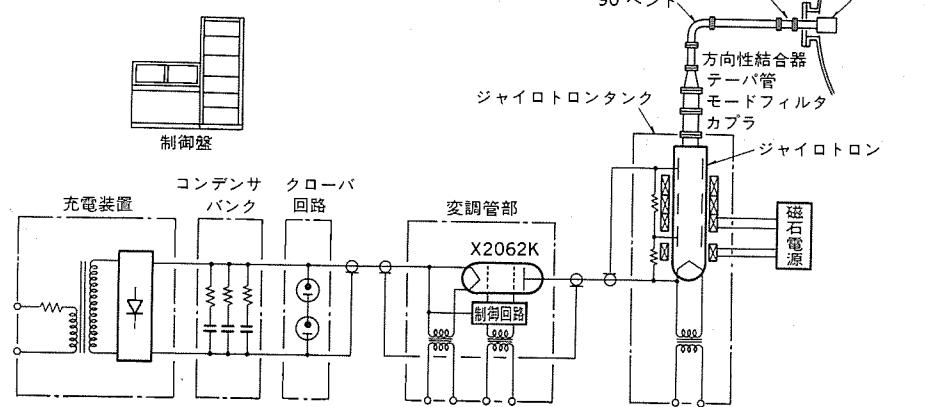


図 8. ECH 装置構成図

表 3. ジャイロトロン 駆動電源の仕様

1 出力パルス電圧 (kV)	-80
2 同上 安定度 (%)	±0.1 以下
3 出力パルス電流	8 A × 5 (40 A)
4 出力パルス幅 (ms)	1~100
5 デュードライ (%)	0.1
6 流入電荷量 (mC)	5 (負荷短絡時)

オトロン核融合研究センターに納入したものは、ジャイロトロン 2 台（昭和 59 年には 5 台となる）同時に駆動できるものである。これを中心にして以下に概要を述べる。

### 3.1 概要

ECH 装置の構成は図 8. に示すように、ジャイロトロン駆動電源、ジャイロトロン発振器及びミリ波伝送回路の三つに大別される。当社は從来、主としてジャイロトロン駆動電源を担当し、他の二つはユーザーで準備されることが多かったが、現在製作中の日本原子力研究所向け JFT-2M 用 ECH 装置では全体を納入することになった。京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに納入したジャイロトロン駆動電源の仕様を表 3. に示す。

ジャイロトロン駆動電源は、仕様に示されるように非常に安定な高電圧パルス定電圧電源であり、かつ負荷短絡時に負荷のジャイロトロンへの流入電荷量を非常に小さな値に抑えジャイロトロンを保護する責務が課せられている。

### 3.2 ジャイロトロン駆動電源の構成と動作概要

ジャイロトロン駆動電源は図 8. に示したように充電器、コンデンサバンク、クローバ回路、制御管部、ジャイロトロントンク、制御盤及び制御管冷却装置などの補機から構成されている。

充電器により充電されたコンデンサバンクの電荷を制御管部の高電圧四極管で定電圧制御してジャイロトロンに定電圧を供給する。万一、負荷のジャイロトロンが短絡した場合はイグナイトロンを使用したクローバ回路を点弧して、コンデンサバンクの電荷を高速で放電させて負荷への流入電荷量を最小に抑えている。

### 3.3 主要構成機器の構成と性能

ジャイロトロン駆動電源の構成機器のなかで、この電源のために特に開発したコンデンサバンク、クローバ回路及び制御管部について構成と性能を示す。

#### (1) コンデンサバンク

コンデンサバンクは  $1.65 \mu\text{F}$ 、 $110 \text{ kWV}$  のコンデンサを 30 台並列接続したユニットバンクを、更に 5 台並列接続してコンデンサバンクを構成している。

コンデンサには 1 対 1 の対応で直列抵抗が入っており、放電エネルギーを吸収している。直列抵抗は耐電圧  $150 \text{ kV}$ 、吸収エネルギー耐量  $10 \text{ kJ}$  以上の特殊な巻線抵抗を使用している。万一、コンデンサに不具合があった場合にも、異常放電電流をパルス電流変成器で検出して、クローバ回路を  $3.5 \mu\text{s}$  以下で点弧することにより、コンデンサバンクを保護している。

#### (2) クローバ回路

クローバ回路はクローバサービス用に特に設計された英国 EEV 社製の高速イグナイトロン BK-7703 A を 6 段直列接続したイグナイトロントンクと各イグナイトロンを同時に点弧するための 6 段パルストラップで構成している。クローバ回路の点弧遅れ時間は、 $1.5 \mu\text{s}$ 、異常検出回路を含めたクローバシステムの遅れ時間も  $3.5 \mu\text{s}$  を得ている。クローバ回路の定格は耐電圧  $110 \text{ kV}$ 、せん頭放電電流  $100 \text{ kA}$ 、放電電荷量  $30 \text{ A}\cdot\text{s}$  である。

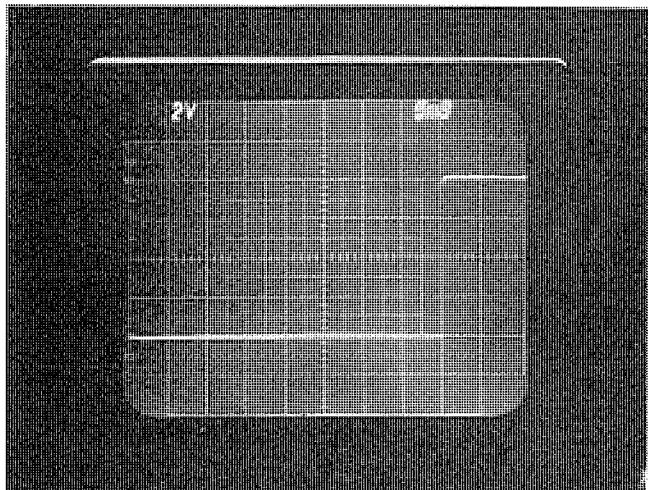


図 9. ECH 装置ビーム電圧出力波形  
(20 kV/div, 5 ms/div)

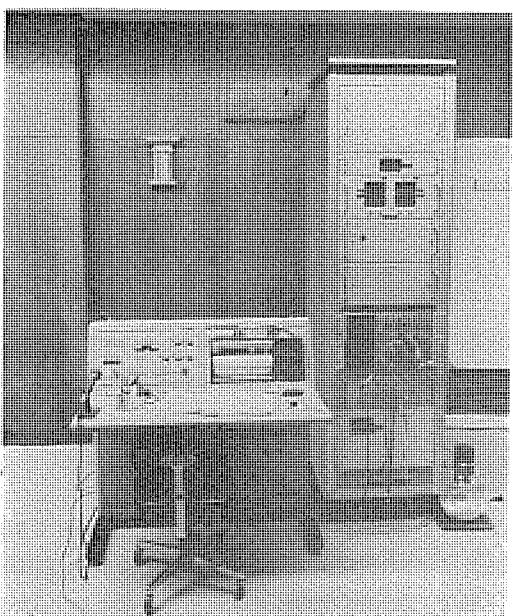


図 10. ECH 装置制御盤



図 11. ECH 装置

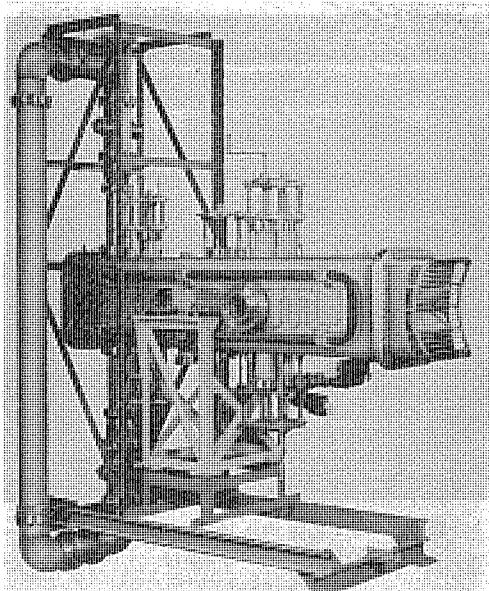


図 12. リッジ導波管結合器

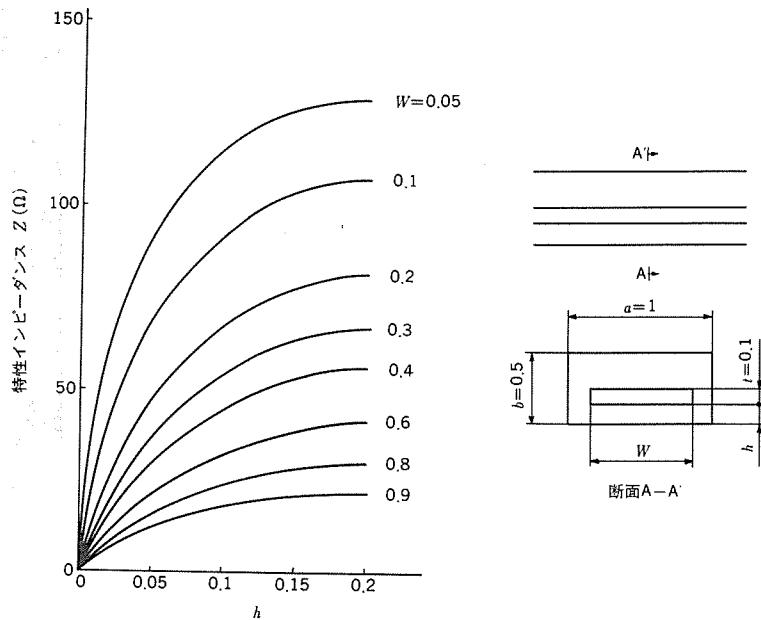


図 13. 特性インピーダンス

### (3) 制御管部

制御管部はこの電源の心臓部で、制御管、制御管制御回路、絶縁トランジストなど構成している。制御管は耐電圧 150 kV、プレート電流 50 A の米国パリアン社製の四極管 X 2062 K を使用している。高電圧側に設置されている制御管制御回路への制御信号は、光リンクを使用して送っている。

出力波形の一例を図 9. に示す。リップル、再現性を含めた電圧安定度は  $\pm 0.08\%$  以下である。図 10. に昭和 57 年度納入した制御盤、図 11. に ECH 装置を示す。

### 4. リッジ導波管結合器

ICRF のプラズマへの結合は、従来ループアンテナで行われてきているが、ループアンテナはプラズマ容器中に存在しなければならず、将来核融合炉となった場合、放射能の被ばくによる劣化や保守上の不安が議論されている。ICRF はプラズマ中のイオンを直接加熱するため、加熱効率が高いと言われるが、これが欠点として潜在している。

日本原子力研究所で、ループアンテナに代る有望なランチャとしてリッジ導波管結合器が計画され、JFT-2M で実証の上、JT-60 にも採用が予定されている。当社では、JFT-2M に設置するリッジ導波管結合器を製作し納入した。このリッジ導波管結合器は現在の JFT-2M の ICRF の周波数で使用するため、平行 2 線式の TEM 線路として製作した。外観を図 12. に示す。また特性検討のため行った特性インピーダンス 放射アドミタンスの計算結果を図 13.、図 14 に示す。

### 5. むすび

今後核融合発電の実現に向けて進んでゆく核融合研究において、高周波加熱法によるプラズマ加熱は、ますます重要になってくると考えられている。そして装置に要求される仕様は、一段と高周波化、高電力化であり、従来は顕在化していなかった問題点の解決が新たな課題として加わってくる。発振管を含む高周波源、高周波電力の輸

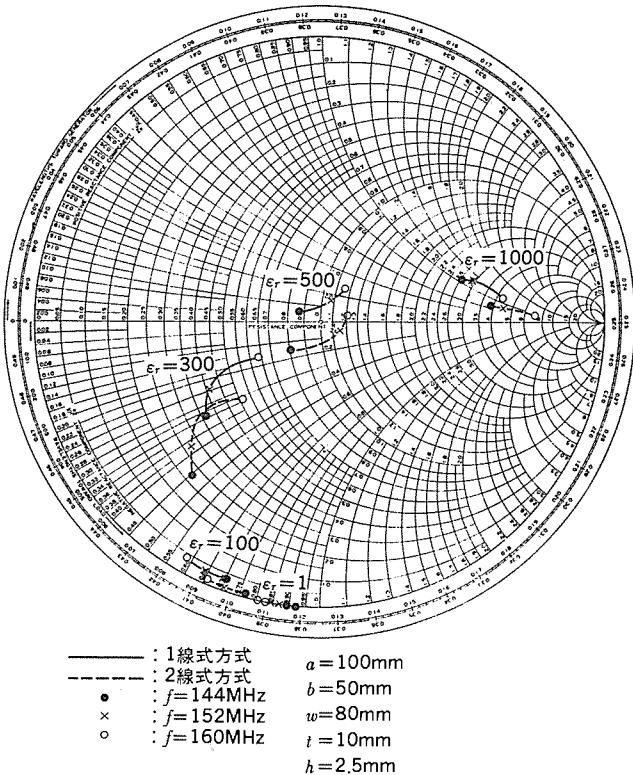


図 14. 放射アドミタンスの周波数特性

送、プラズマへの高周波電力の伝達について、我々は、広範な技術を結集して、これらのテーマに取り組む所存である。

最後に、これまで御指導いただいた日本原子力研究所、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター、名古屋大学プラズマ研究所など諸研究機関の関係各位に深く感謝申し上げる。 (昭和 59-1-19 受付)

## 核融合試験装置用電源・制御装置

林 重雄\*・山中芳宣\*\*・村上輝男\*\*・湯浅和典\*\*・大藪 熊\*\*\*

## 1. まえがき

核融合試験装置用電源は、短時間に直流大電力を供給し、かつ高精度、速応答制御が要求される<sup>(1)</sup>。

一般に、放電実験運転は数分ないし十数分に1回の割合で行われるので、電力系統にとっては間欠負荷となり、変動幅の大きい場合、負荷を平滑化することが必要である。あらかじめ所要のエネルギーをコンデンサ、インダクタンス、フライホイールなどに蓄積しておき実験時にこれを放出する方法がとられている。エネルギーの大きい場合には運転のしやすさ、経済性の面からフライホイール発電機が採用される。

トカマク装置において、トロイダル磁場コイルはトーラス大周方向に一定の磁場を発生させるもので、負荷コイルの中では最も消費電力が大きい。ポロイダル磁場コイルは、プラズマの励起、ジュール加熱、プラズマの位置の安定化、プラズマ断面形状の制御などを行うコイル群で、これらのコイルに対する電源は高速、広範囲の制御が要求され、サイリスタ変換器を中心とした装置となっている。

制御装置は多様な運転モードに柔軟に対応できる操作性が要求さ

れ、デジタル方式が広範囲に採用される。これらの制御装置及びその間を結ぶ信号伝送回路は、急峻に変化する高磁場の環境下におかれるためサージ、ノイズ対策が重要な課題である。電磁シールド、フィルタ、接地方式についての十分な検討が必要であり、光伝送方式の適用が効果的である。

日本原子力研究所において建設中の臨界プラズマ試験装置(JT-60)のトロイダル磁場コイル電源設備、及び昭和58年4月同研究所に納入したJFT-2Mトカマクのポロイダル磁場コイル電源、制御装置は、当社が製作を担当した。設備の概要と技術的課題について以下に紹介する。

## 2. JT-60 トロイダル磁場コイル電源

JT-60 トロイダル磁場コイル電源は、磁界プラズマ試験装置(JT-60)のトロイダル磁場コイル(1.9H, 90mΩ)に10分間隔にて52.1kAの電源を通電し、5秒間維持するためのものである。

## 2.1 システムの概要

この電源設備の構成を図1に、主要機器の定格を表1に示す。電源

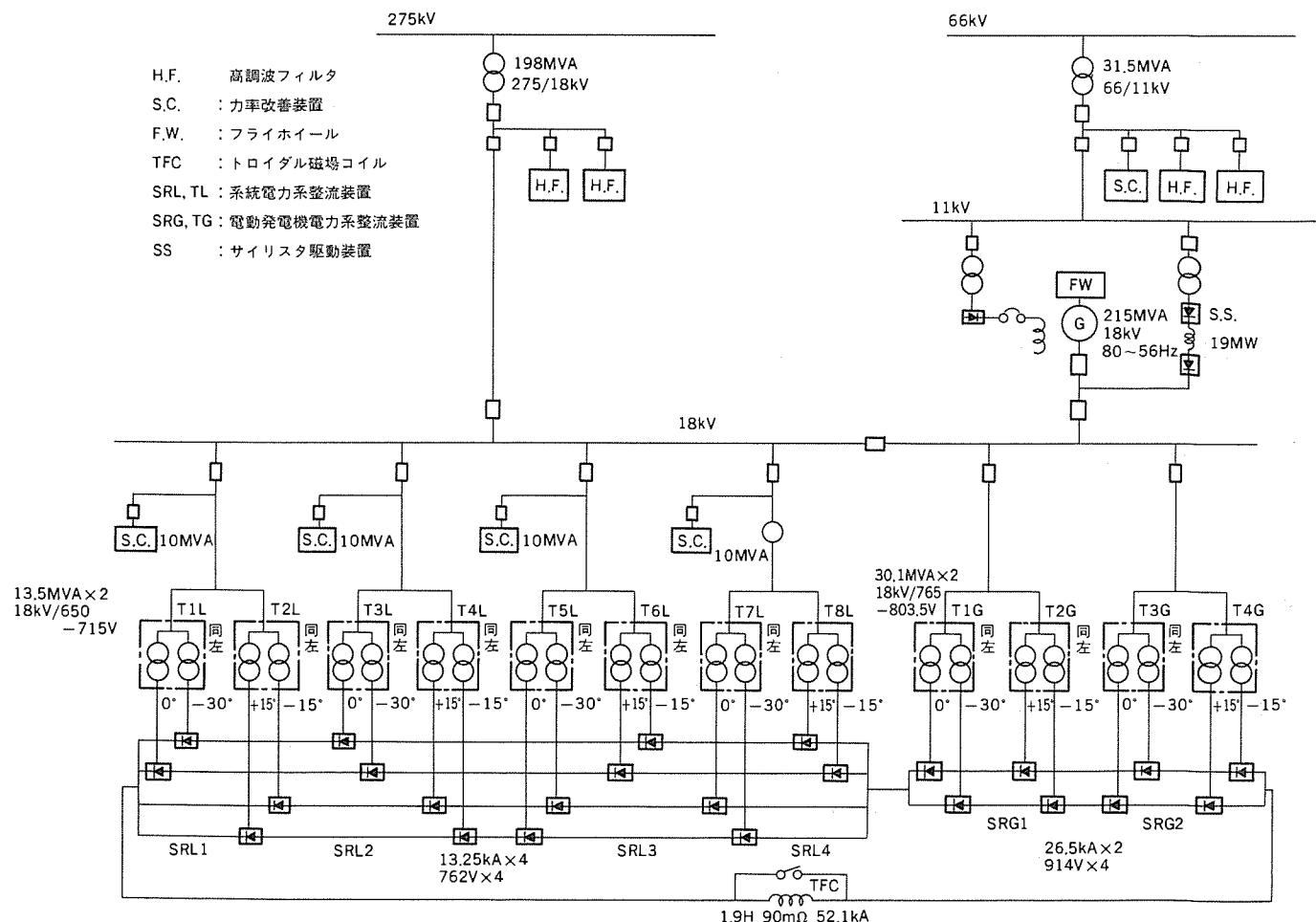


図 1. JT-60 トロイダル磁場コイル電源回路構成

表 1. JT-60 トロイダル 磁場 コイル 電源主要機器定格表

電動発電機電力系		系統電力系		
発電機	立軸, 回転界隈, フライホイール付き三相交流同期発電機	1台	送油自冷	1台
	出力 (MVA)	215	容量 (MVA)	198
	電圧 (kV)	18	電圧 (kV)	275±27.5 /18
	電流 (A)	6,896	周波数 (Hz)	50
	力率	0.85	受電変圧器	
	周波数 (Hz)	80~56		
	回転数 (使用範囲) (RPM)	600~420		
	はすみ車効果 (t·m <sup>2</sup> )	16,000		
整流器用変圧器	放出エネルギー (MJ)	4,020		
	サイリスタ駆動装置 (MW)	19		
整流器	油入自冷	4台	油入自冷	8台
	容量 (MVA)	30.1×2	容量 (MVA)	13.5×2
	電圧 (kV)	18/0.765 -0.8035	電圧 (kV)	18/0.65 -0.715
整流器	三相ブリッジダイオード整流器	8台	三相ブリッジダイオード整流器	16台
	出力 (MW)	24.2	出力 (MW)	10.1
	電圧 (V)	914	電圧 (V)	762
	電流 (kA)	26.5	電流 (kA)	13.25

は 275kV の商用系統から直接受電する系統電力系電源と、受電した電気エネルギーをフライホイールに蓄積し、パルス的に発電放出する電動発電機電力系電源から構成される。両電源は、整流装置の直流側で直列に接続され、最大定格運転時には 1 通電あたり約 9GJ、ピーク時 330MW の電力をトロイダル磁場コイルに供給する<sup>(2)</sup>。電源設備の制御及び監視は、マイクロコンピュータを内蔵した CAMAC クレート群による分散システムを採用し、自動化を図っている。

## 2.1.1 系統電力系電源

系統電力系電源機器の構成及び仕様は、負荷変動によって生じる電力系統への影響が許容範囲に収まるよう、次のとおり決定した。

- (1) 系統電力系からの許容電力量を 160MW とし、不足分は電動発電機電力系で補う。
- (2) 整流器は高調波電流の抑制と直流回路のリップル低減を目的に 24 相整流回路とするが、更に系統側の高調波条件を満足させるため高調波フィルタを設ける。
- (3) 負荷の瞬断幅を許容値以下とするため、整流回路は 4 バンク構成とし、各バンクは間隔をおいて遮断する。
- (4) 各整流器バンクに力率改善装置を設け、ピーク負荷時の力率を改善することにより、系統の電圧変動を低減させる。

## 2.1.2 電動発電機電力系電源

この電力系は 215MVA フライホイール付き発電機、発電機駆動装置、励磁装置及びこれらを接続する開閉設備などから構成される。

発電機に要求される放出エネルギーが 4,020MJ と大きいため、発電機はフライホイール直結形とし、はすみ車効果を大きくするとともに、高速回転域を利用する設計としている。本機はフライホイール付きでは記録的大容量、高速、高重量機であり、特に疲労強度、スラスト軸受、軸系強度の設計は上記特殊性を十分考慮してい

る。

発電機の駆動は誘導電動方式に比較して、①空転損失の低減及び電力回生による節電効果、②発電機の軸系が短くなることによる軸系剛性の向上などの利点があるサイリスタ駆動方式を採用した。このため、駆動装置の受電回路にも高調波フィルタ及び力率改善コンデンサを設置している。

負荷コイルの電流制御は、発電機の界磁制御と整流器バンクの台数制御で行う。このため励磁装置は、応答が速くかつ制御範囲の広いことが要求される。励磁装置はサイリスタ方式とし、計算機シミュレーションにより制御特性の確認を行った。また励磁制御をデジタル化することにより、負荷コイルの特性変化に柔軟に対応できるシステムとしている。

## 2.1.3 整流装置と直流回路設備

循環電流の制御を目的に、互いに位相の異なる 4 台のダイオード整流器を直列に接続したものを、系統電力系は 4 組、電動発電機電力系は 2 組並列に接続し、24 相整流回路を構成している。このシステムは機器が短時間容量のため転流リアクタンスが大きく、受電変圧器や発電機といった共通リアクタンスにより、1 台の整流器の転流動作が他の整流器に影響を与え、電圧降下が大きくなる。システム設計にあたり、24 相整流装置のレギュレーションについて理論解析を行い、数値的に検討した<sup>(3)</sup>。

この結果、整流器用変圧器と整流器間を接続する低インピーダンス導体として、1,200mm<sup>2</sup> の同軸形電力ケーブルを開発した<sup>(3)</sup>。また、同軸形ケーブルは、ケーブル相互間に短絡電磁力が発生しないため、施工が簡単に見えるという利点がある。図 2 に主要機器の断面配置と接続関係を示す。トロイダル磁場コイルへの直流給電線は、漏えい磁束の影響が小さく、短絡時の電磁力処理が容易な同軸形母線を採用した。

## 2.2 フライホイール付き電動発電機

本機は立軸、フライホイール付きでは記録的大容量機であり、特にフライホイールについては、世界最大である。本機は高速回転の高重量機であり、かつ通常の発電機とは異なった高頻度の繰返し間欠運転を行うために、設計・製作には特殊性が十分考慮されている<sup>(4)</sup>。

通風冷却は、回転子自身のファン作用だけでは所要の冷却風量を確保することが困難となるので、別置電動ファンによる強制冷却方式を採用した。スラスト軸受は、設計荷重 1,000t、軸受平均面圧 39 kg/cm<sup>2</sup>、最大外周すべり速度 67.5 m/s と大容量品である。軸系の第一次の危険速度は、最高回転数の 120% 以上に設計した。必要な軸受支持剛性は 300 t/mm 以上と、従来の水車発電機の実績を越えるものである。

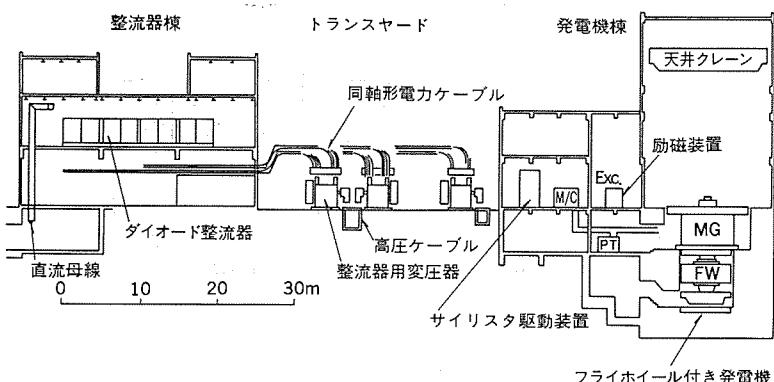


図 2. 断面配置図

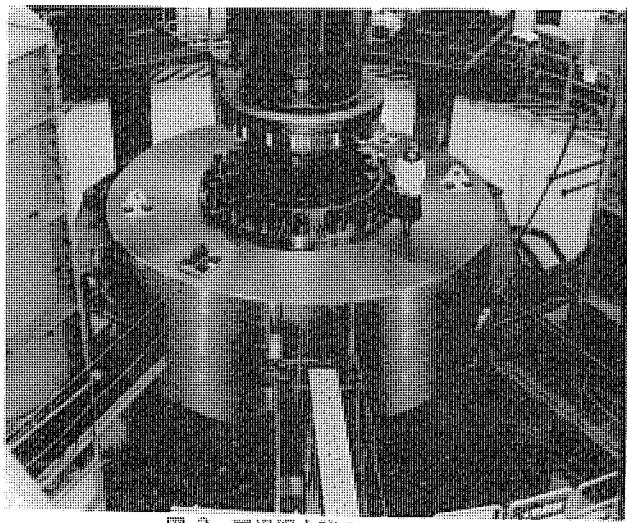


図3. 工場組立時のフライホイール

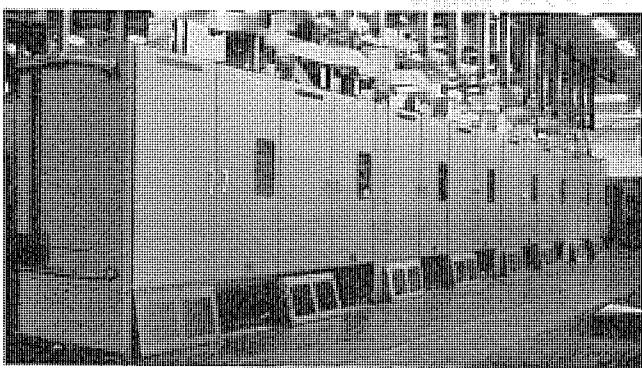


図4. ダイオード整流器

この発電機は、サイリスタ駆動装置及び24相整流装置に接続されるので、発電機固定子巻線には常時高調波電流が流れる。そのため、高調波過熱及び脈動トルクによる軸系のねじり振動について検討し、十分安全であることを確認した。フライホイールのはずみ車効果(GD<sup>2</sup>)は、必要GD<sup>2</sup>、16,000t・m<sup>2</sup>のうち87.5%を占める。直径6.6m、長さ2.4m、重量約650t、放出エネルギー4.02GJと、大きさ、重量、放出エネルギーの点で世界最大である。6枚の中実円板を16本の通しボルトによって、9,000t以上の締付力で締結した。図3に工場組立時のフライホイールを示す。

### 2.3 ダイオード整流器

この整流器は、従来のレクチフォーマータイプ(整流器用変圧器と一体構造)と異なり単独で屋内に設置されるため、省スペース、保守性を考慮して両面形とし、交流導体を

直流P及びN導体でサンドイッチにしてキューピクル中央に配置し、直流P及びN導体に3,500Aの大容量平形素子、水冷冷却フィン及び限流ヒューズを直接圧接する構造とした。水冷冷却フィンには、今回新たに開発した85φ素子用のアルミ製冷却フィンを採用し、ダイオードの両面及び限流ヒューズの片面を冷却するとともに、直流P及びN導体も冷却している。

更にサンドイッチの中央に位置する交流導体は、直接冷却水で冷却することにより、キューピクル内に発散する熱を極力少なくした。またこの電源の特長である高頻度の繰返し間欠運転による、導体の熱膨脹、熱収縮で支持物の変形、破損を防止するため、導体支持部にはすべて滑り機構を設けている。更に直流側短絡事故時の過大電流による吸引力、反発力で導体の変形、支持物の破損がないよう十分な強度を持たせている。図4に流整ダイオード器の外観を示す。

### 2.4 制御装置

核融合試験装置の電源は、本体コイルを通じてプラズマの位置・形状に影響する重要なもので、その制御方式が実験テーマでもあり運転の自由度が要求される。トロイアル磁場コイル電源制御設備は、JT-60を構成する一つのブロック設備で、全体の統括制御を行う全系制御設備の指令に基づいて運転される。

#### 2.4.1 装置の構成

JT-60制御システムの基本的考えに従い、制御棟、整流器棟電源制御室、各現場にそれぞれCAMAC盤、制御盤、現場盤を設置し、階層化、機能分散形構成としている。

CAMACはデータ伝送のための規格で、JT-60では統括制御、保守などの面から全面的に採用されている。各CAMACクレートにはマイクロプロセッサを内蔵し、制御システムの中核として情報処理機能をもつと共に機能分散させることにより、制御速度の向上を図っている。建物間にまたがる信号伝送系のシリアルハイウェイは、光ファイバを

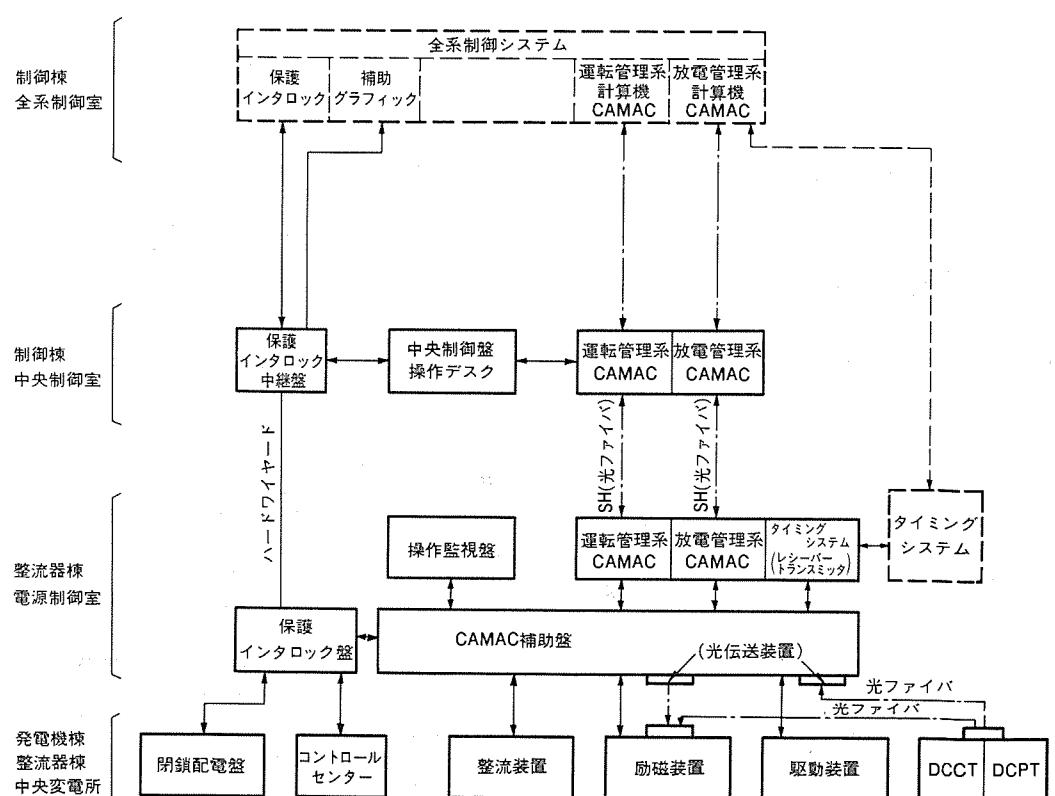


図5. 制御システム構成図

使用してケーブルでの誘導障害を受けないようにしている。CAMACシステムと閉鎖配電盤、駆動装置、励磁装置など現場機器との間には、操作監視盤、CAMAC補助盤を設け基本的な制御シーケンスをハードウェアで組み込むとともにフィルタ、信号変換器を設け、現場機器や途中のケーブルからサージ・ノイズがCAMACシステムに侵入するのを阻止している。

保護インターロック信号は、信頼性、時間遅れの観点からハードウェアで実施し、リレーを収納する盤は耐震構造としている。これらの全制御システムの構成を図5に示す。

## 2.4.2 運転・制御方式

運転は実験モードにより、系統電力系単独、電動発電機電力系単独と両者の組合せがあり、自由に選択して使用することができる。全系運転の場合、実験パラメータを全系制御設備の計算機がCAMACシリアルハイウェイを通して伝送し、トロイダル磁場コイル電源設備のCAMACシステムでこれを受け、パラメータの合理性を確認し各装置に伝達する。電動発電機電力系へは、サイリスタ駆動装置に電動発電機回転数を、サイリスタ励磁装置にトロイダル磁場コイル電流値を、そして系統電力系へは整流装置の使用バンク数を設定する。

放電制御運転においては、発電機の励磁系を介してトロイダル磁場コイル電流のフィードバック制御を行う。励磁制御装置は、マイクロプロセッサを用いたデジタル方式で指定の電流パターンに柔軟に対応できるとともに制御性能の向上を図っている。トロイダル磁場コイルの電流、電圧は、それぞれ高精度、高速応の直流変流器(DCCT)、直流分圧器(DCPT)で検出し、耐サージ、耐ノイズ特性の面から光伝送装置を適用し系の信頼性を高めている。制御シーケンスは、各ブロック設備間の同時性をとるため、放電制御用計算機から発信されるタイミングシステムによって実行される。

## 3. JFT-2M ポロイダル磁場コイル電源・制御設備

JFT-2Mは過去に得られた成果を発展させ、かつ創意工夫に富む新な試みを実施することにより、トカマク装置の最適化を図ることを目的とした装置である。<sup>(5)</sup>

### 3.1 システムの概要

このシステムは、各種ポロイダル磁場コイルに電力を供給する電源設備と、それらの磁場を制御してプラズマの位置及び形状を制御するプラズマ制御設備と、装置全体を統括管理する運転制御設備により構成される。

電源設備のうち、抵抗加熱用コイル(OH)と平衡磁場コイル(S)は立上げ時間を急峻にするとともに、持続時間を伸ばし、かつ波形制御が必要であるため、サイリスタ電源とコンデンサ電源により構成される。それらは初め高圧に充電されたコンデンサ電源から電力を供給し、続いてサイリスタ電源に転流する方式とし、両者間の波頭調整が行われている。それら波頭調整は、充電電

圧、コンデンサ容量、調整用リクトル値及び通電タイミングの組合せにより、最適に調整できるようにされている。他のコイルの電源設備は、急峻な立上げ時間を必要とせず、サイリスタ電源のみから電力を供給する方式としている。

プラズマ制御設備は、コイル電流波形をプログラムするためのデジタル計算機とプラズマ信号をフィードバックし、コイル電流制御を行うためのアナログ計算機により構成され、ポロイダル磁場の多様性に、柔軟な対応ができるようになっている。これらの機器は多くの電子回路から構成され、プラズマや2段加熱設備から発生するノイズの影響を受けやすいため、核融合設備特有のノイズ対策が施されている。

運転制御設備は、JFT-2Mを構成している設備機器を総括的に管理し、安全かつ円滑に運転することを目的とし、各設備の起動停止、インターロック、運転モードの切換、運転状態の表示記録などを行っている。

### 3.2 プラズマ制御設備

プラズマの立上げ、位置制御は、各ポロイダルコイルへの通電電流を制御して行うもので、通電タイミングの制御、通電波形の設定及び制御が必要である。JFT-2Mプラズマ制御系ブロック図を図6に示し、次に詳細を述べる。

#### (1) 通電タイミングの制御

コンデンサ電源の立上げ及び波頭調整など、各ポロイダル磁場コイルの始動及び制御のタイミングは各設備間の協調をとり、かつ正確に行わなければならない。このため系統電源の母線から整流器と同相の600Hz(1.67ms)の基準パルス信号を作り、全設備のタイミング基準信号としている。

主制御盤からの放電スタート信号は、コンデンサ制御盤で1.67msパルス信号と同期がとられた後、放電トリガ信号としてコンデンサ設備へ、また光ファイバケーブル信号に変換されてプラズマ制御盤に送られる。プラズマ制御盤ではその信号が通電波形設定器及びアナログコンピュータをスタートさせるとともに、再び光ファイバケーブル信号に変換されて、サイリスタ制御盤に送られサイリスタ制御回路スタート信号(マスタ信号)と

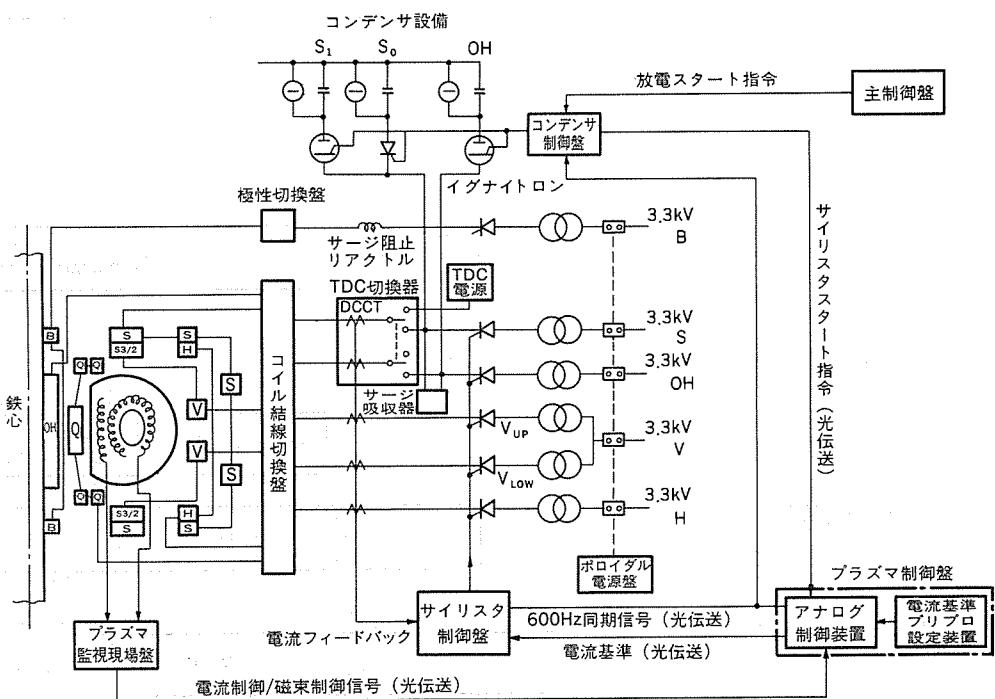


図6. ポロイダル磁場コイル電源・制御系統図

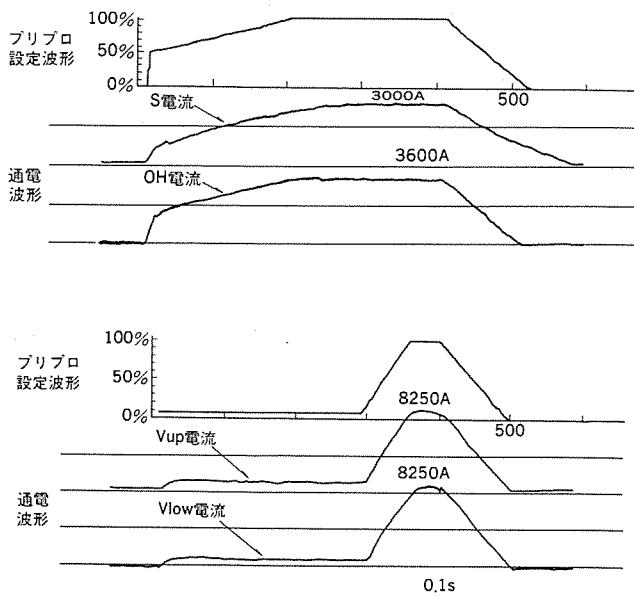


図 7. コイル電流基準及び実測波形

表 2. JFT-2M ポロイダル磁場コイル電源設備の機能及び定格一覧

ポロイダル コイル 系統名	機能	電源	電源種別	定格	制御方式
抵抗 加熱 コイル	鉄心を通る主磁束を発生させ、プラズマを加熱する。	OH	OH バンク	直並切換	
	コンデンサ 6kV 7.5mF OH-S 兼用バンク 10kV 3.2mF		充電電圧制御		
平衡 磁場 コイル	鉄心を通る主磁束とプラズマ平衡磁場を発生させる。	S	S <sub>0</sub> バンク	直並列切換	
	コンデンサ 20kV 50μF S <sub>1</sub> バンク 10kV 7.2mF		充電電圧制御		
垂直 磁場 コイル	NBI, ICRF などの加熱入力を伴って高 $\beta$ 化するプラズマ平衡保持に必要な垂直磁場の変動分の補正並びにプラズマ水平方向位置を決定する。	V <sub>UP</sub> V <sub>LOW</sub>	サイリスタ 275V +8kA 整流器	プリプログラミング波形 + 電流可逆制御	プリプログラミング波形 + フィードバック制御
	サイリスタ 275V +8kA 整流器		-5.5kA		
四重極磁場 コイル	プラズマ非円形断面などの平衡磁場や磁気リミッタ配位の磁場を発生させる。	Q	サイリスタ 250V 8kA 整流器	プリプログラミング波形制御	
水平 磁場 コイル	プラズマ水平方向磁場の補正並びにプラズマ垂直方向位置の決定。	H	サイリスタ 1,200V ±1.1kA 整流器	プリプログラミング波形 + フィードバック制御	
バイアス コイル	鉄心総磁束量を得るために 1/2 総磁束量を負に予偏励磁する。	B	サイリスタ 520V 270A 整流器	固定設定 20秒/2.5分 定格	定電流制御

注 特記外のサイリスタ整流器は 2.5 分周期で 1 秒定格である。

なる。

## (2) 通電波形の設定・制御

プラズマ制御装置は実験を合理的に進めるため、プロセッサとして《MELCOM 70》形計算機 (128 K バイト) を備えた ポロイダル 磁場コイル用通電波形設定器 (プリプロ波形設定器) が設けられ、サポートプログラムでマンマシンインターフェースにより、波形設定が容易にかつ柔軟に行える構成になっている。すなわち区間、及び直線、sin, cos などのカーブの種類がキーボードで選定され、CRT 上につなぎ合わされて設定波形が作成される。

通電波形の制御にはプラズマの安定化を図るために、フィードバック制御方式が採用されており、あらかじめプリプロ波形設定器で設定された波形は、既述の基準パルス信号によりバッファメモリから読み出され、D/A 変換されて電流設定信号となる。電流設定信号はアナログ計算機に入力され、プラズマからの計測信号により補正された後、サイリスタ電源へ制御信号として与えられる。図7 はプリプロ設定波形と通電波形の実例を示す。通電波形は設定波形に忠実に追随していることがわかる。

## 3.3 ポロイダル磁場コイル電源設備

プラズマの励起・加熱・維持・形状制御などを行うために各種のコイル群があり、これらのコイルは、個別の電源設備により励起されて、ポロイダル磁場が形成される。JFT-2M のポロイダル電源設備の機能・定格の一覧表を表2 に掲げる。

サイリスタ電源設備は、各コイル電流を高速でかつ高精度に制御し、電源高調波を低減するために、すべて 12 相整流回路を採用した。プラズマ電流遮断時のサーチ電圧、並びに高電圧コンデンサ設備などからの負荷コイル並びに低電圧サイリスタ整流器の過電圧保護は、印加電圧の極性を検討して、トリガ放電ギャップ・CR サージアブソーバ・ブロッキングダイオード・サイリスタバイパス点弧・逆並列サイリスタスイッチなどを使い分けた。

### 3.3.1 コンデンサ設備

JFT-2M 高性能トカマク開発試験装置は、JFT-2 の更新設備であるため、コンデンサ設備のうち、コンデンサバンク・充電設備・TDC 放電洗浄電源などの既設品を一部流用したが、このシステムに適合させるために全面的に改造・新設設備となった。主な構成要素は、コンデンサバンク・充電設備・放電設備・サージ吸収器・コンデンサ制御盤・TDC 高速放電洗浄電源・TDC 切換器などである。

プラズマ研究の拡張性を図るために、コンデンサバンクは直並列に接続可能のこと、並びに容量の 2 進設定が可能なようにした。また、時定数調整 リアクトルに多くのタップを持たせることとした。

### 3.3.2 サイリスタ整流器

サイリスタ整流器は、大電流装置であるので、整流器用変圧器と整流器間の接続バスの リアクタンスによる転流電圧降下を極力抑えるように整流器用変圧器と整流器を一体構造の レクチホーマタイプを採用した。また、短時間定格を考慮して密閉循環風冷・二次水冷方式とし、半屋外設置形とした。

整流器 1 面には、各コイル系統ごとの 12 相整流回路とブロッキングダイオード・サイリスタスイッチなどの過電圧保護装置を収納し、前面点検形として予防保全の便を図った。サイリスタ制御盤は、サイリスタ整流器の制御、保護及び故障表示などを実行するもので、プラズマ制御盤からの定電流基準信号、タイミング信号の制御信号は光伝送により、インターフェースをとり、制御カード部はシールドケースにて密閉するなど核融合試験装置特有のノイズ環境を考慮して設計・製作した。

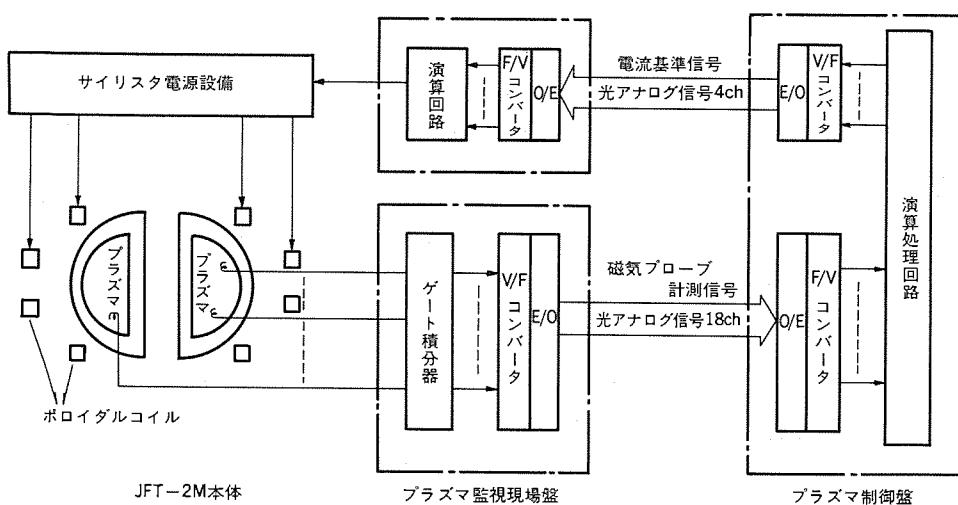


図 8. 光伝送技術の適用例

### 3.4 制御技術の開発

JFT-2M の設計・製作にあたり、以下に示す新技術を開発した。

#### 3.4.1 光伝送技術

核融合装置は真空容器本体をはじめ、大電流を流すコイル電源、高周波加熱設備など主要構成設備自体が大きなノイズ発生源である。このため、計測制御設備にとってサージ、ノイズ対策は重要な課題であり、その対策として接地系、回路方式、フィルタなどの設計改善のほか光伝送方式のもつ絶縁性、耐ノイズ性、高帯域低伝送損失などの特長を生かした技術の活用が不可欠となる。その適用例を図8に示す。

##### (1) 計測系

プラズマ位置を計測するため、真空容器本体に埋め込まれた磁気プローブの出力信号を積分し光アナログ伝送を行っている。

##### (2) 制御系

プロイダル電源設備へのサイリスタ電流基準信号、放電トリガ信号及びタイミング信号などに光ファイバを使用し、ノイズ対策と信号の同時性を追求したシステムとしている。

#### 3.4.2 電流検出器

プロイダル磁場コイル電流を制御するため、フィードバック信号検出用として、大電流かつ高精度であるとともに核融合特有のサージ・ノイズ雰囲気においても正常に動作する電流検出器が必要となる。このため励磁電流の少ない鉄心を使用し、比誤差を小さくした並列形直流変換器を基本とし、半導体整流器と抵抗器を組み合わせた大電流高精度の電流検出器を開発した。また、この電流検出器はプラズマ及び第2段加熱装置から発生する強ノイズ環境下に置かれるため、事前にJFT-2設備のものとノイズ試験を行い、その結果に基づいて有効なシールドを施した。

電流検出器は、検出ヘッド、コンバータ、抵抗箱から構成される検出ヘッドは、1個の環状鉄心とその上に巻かれた2個のコイルを組み合わせ、貫通穴に被測定電流（一次電流）を流す導体を貫通させる構造とした。コンバータは、電源及び整流回路部をもち、抵抗箱は電流信号を電圧信号に変換するための高精度、低ドリフト負担抵抗を内蔵している。

また、被検出電流が両極性の場合は、別途バイアス巻線を設け、一定の電流値を二次電流に加算する方式としている。電流検出器の共通仕様を表3に示す。

#### 3.4.3 サージ・ノイズ・接地対策

多くの電子回路から構成される計測制御系は、プラズマや第2段加熱設備からノイズの影響を受けやすく、制御の安定化を図るためにはサージ・ノイズ・接地対策が必要となる。このため日本原子力研究所と共同で事前に既設JFT-2設備において、シールド方式、配線方式、フィルタ効果並びに接地方式についての予備試験を行い、その結果を設備の計画、設計、据付けに反映した<sup>(6)</sup>。具体的には制御盤下部の銅板設置、電子回路部のアルミニウム化、入出力信号の光ファイバ伝送化を実施しており、構成図を図9に示す。

JFT-2Mは多くの設備から構成され、本体設備、第2段加熱設備などの大電力設備からの接地電流により、ノイズやサージを発生し計測制御系に悪影響を与えるおそれがある。このため接地系を5系統に分離し、各設備ごとにそれぞれの目的に合った接地極に接続し、

表 3. 電流検出器の仕様

通電電流		1秒/2.5分間隔	
精度		±0.2以下	
周波数応答 (kHz)		2(-3dB)	
絶縁耐圧		AC 2,000V 1分間	
温度ドリフト (%/°C)		0.002max	
周囲温度 (°C)		-10~+40	
電源電圧変動 (%)		±0.1以下 (入力電圧±10%変化に対し)	
リップル (%)		0.5max	
		Sコイル	OHコイル
被検出電流 (A)		0~+7,500	0~+3,600
出力	電流 (A)	0~+0.8	0~+0.8
	電圧 (V)	0~+5	-3.333~+5
過負荷電流 (A)		+9,000	+5,000
		-7,000~+9,000	

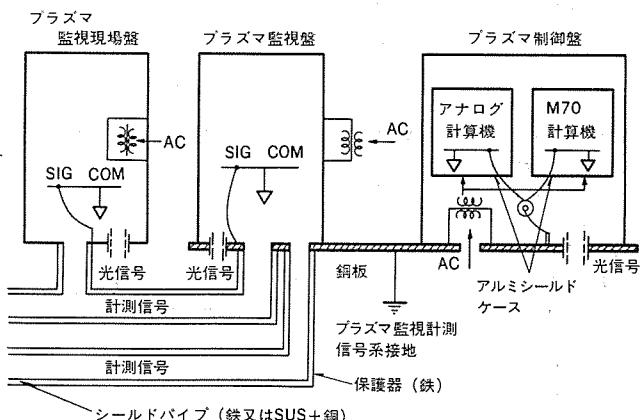
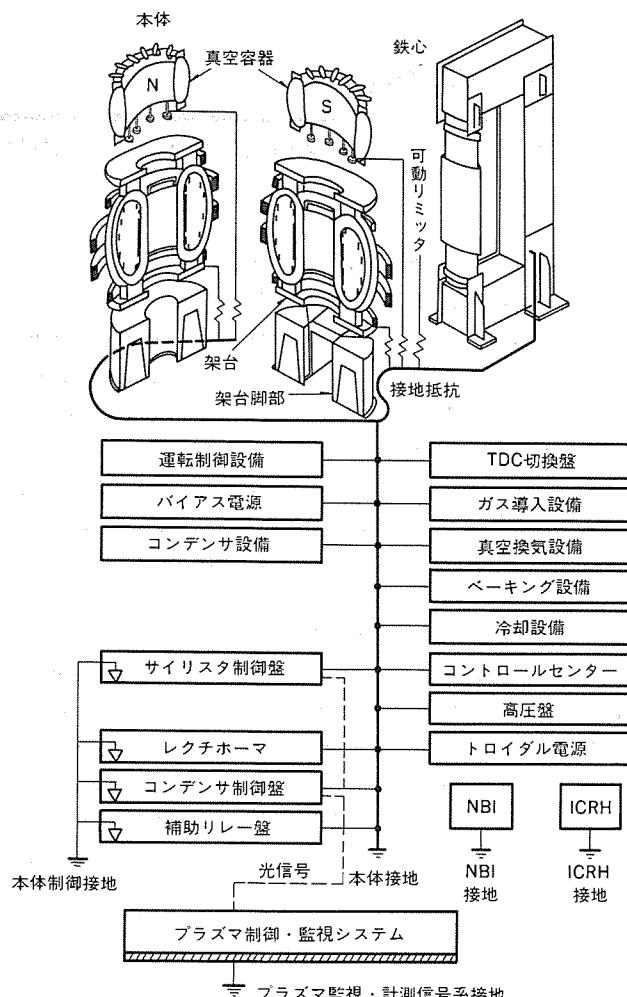


図 9. プラズマ監視計測信号の接地及びシールド構造



10. JFT-2M 各接地極に接続される機器及び設備ブロック図

相互に影響を受けないよう計画、施工されている。図10に各接地極に接続される機器及び設備ブロック図を示す。

#### 4. む す び

核融合試験装置の電源、制御装置について当社が製作した設備の概要を紹介した。これらの装置を製作にあたっては、日本原子力研究所の研究成果の採用、同研究所担当各位の御検討、御助言に負うところ大であり、ここに感謝申し上げる。

電源の回路方式、構成機器は各試験装置ごとに異なるものであり、今後、装置が更に大型化、高度化したときこれに対応した新しいシステムの開発、装置の開発が必要となってくるものと考えられる。

#### 参 考 文 献

- (1) 岸野ほか：トーラス装置用電源、電気学会雑誌、Vol. 100, No. 9, p. 797～p. 804 (昭 55-9)
- (2) 湯浅ほか：トロイダル磁場コイル電源ダイオード整流器システム、電気学会高電圧研究会 HV-82-37 (昭 57-9)
- (3) 磯野ほか：トロイダル磁場コイル用整流器システムにおける大電力同軸ケーブルの適用について、電気学会高電圧研究会 HV-82-38 (昭 57-9)
- (4) 中山ほか：JT-60 トロイダル磁場コイル電源 フライ・ホイール付発電機、電気学会高電圧研究会 HV-82-31 (昭 57-9)
- (5) T. NARIKAWA et al.: CONSTRUCTION OF THE JFT-2M TOKAMAK (5) DESIGN AND FABRICATION OF POLOIDAL COIL POWER SUPPLY SYSTEM, IEEE 10 th SYMPOSIUM DEC 1983
- (6) I. OYABU et al.: CONSTRUCTION OF THE JFT-2 M TOKAMAK (6) DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF NOISE PREVENTION AND GROUNDING SYSTEM, IEEE 10 th SYMPOSIUM DEC 1983

# 核融合装置の設計・解析プログラムの開発

西川正名\*・亀有昭久\*\*・塙本忠則\*\*\*・松岡不識+・八十島義行++

## 1. まえがき

多くの工業製品の設計が電子計算機による高度かつ多量の計算に依存するようになっている。核融合装置は技術として新らしい分野であり、またその進化の速度が急激であるために蓄積された経験技術に立脚するよりは、むしろ大形電子計算機を使用した系統的、高精度の解析に依存する割合が他の産業分野に比較して大きいといえよう。

核融合分野における電子計算機の利用としては、①核融合装置設計における技術計算、②プラズマ物理分野における科学計算、③実験装置の制御及び計測データ処理、に大別される。これら各々の電子計算機利用技術はいずれも先端的であり、また相互に密接な関係を持っているものであるが、本稿では①に掲げた「核融合装置設計における技術計算」のうち、本体に関係するものについて、三菱グループの核融合装置設計グループが開発整備してきた電子計算プログラムシステムの概要を紹介する。

なお、本論に入る前に若干の言葉の定義をしておく。先ず、「核融合装置」という言葉は本来非常に広い範囲を覆う概念であるが、ここでは便宜上トカマク型の比較的大形の実験装置、又は炉を念頭において議論を進める。これは大形装置の方が広い分野の技術、例えばブランケットや遮へいの核解析を含んでいるためであり、したがって小形装置に対しても以下の議論は多くの点で適用可能である。また、トカマク型以外の核融合装置に対しても以下で述べる点は多くの面で成立する。次に電子計算機については、「相当程度のプログラムが可能なもの」という比較的ゆるやかな定義づけにしておくが、現状のレベルでいえばミニコンピュータと呼ばれているもの以上の機能をもつ計算機を想定している。また、このような計算機を使用しての解析・計算作業を以下では「電子計算」と呼ぶ。

## 2. 核融合装置設計と電子計算

### 2.1 核融合設計の特長と電子計算の必要性

核融合装置をその構成技術の面からみると、 $\sim 10^{-8}$  Torr の超高真空中に $\sim 10^8$  K の超高温プラズマを数 T の磁場で閉じ込め、プラズマ内の核融合反応で生成する 14 MeV 中性子をブランケットで熱化し、エネルギーとして取り出す装置である。プラズマ閉じ込め用の磁場発生には超電導マグネットを使用するので、絶対零度近傍 ( $\sim$  数 K) の極低温環境が必要であり、またプラズマ安定化に必要な数 MA を越えるプラズマ電流は電磁誘導によってプラズマに印加する。すなわち、核融合装置は超強放射線、超高温、超高真空、極低温といった開発途上にあるいわゆる「超技術」が共存する非定常電磁気機械であるといえる。このように、核融合装置は他のエネルギー源に比較して基礎となっている技術的背景が高度か

つ複雑であるが、その様子を図 1. に示す。

それでは核融合装置設計では何故に電子計算が必要なのだろうか、その事情を図 2. によって以下に説明する。第 1 の理由は、現象が大形かつ複雑な点にある。すなわち、非定常の電磁気、機械、熱、核といった多種類の物理現象が相互に絡み合っており、かつ各現象の作用効果が無視できないほどに大きな値となることが多い。したがって、多種類の物理現象を同時に考慮した解析が必要となるが、このような解析は電子計算でなければ不可能である。更に、核融合装置は構造が複雑であるので、解析モデルも複雑なものとなり、この点からも電子計算は不可欠となる。

第 2 の理由は現象の非線形性である。核融合装置では多くの設計計算が非線形的な性格をもっている。例えば、プラズマの主半径と出力、ブランケットの厚さとトリチウム増殖率や発熱、プラズマとコイルや構造物間の幾何的関係と電磁気的相互作用、などすべて非線形関係にある。すなわち、設計過程において設計パラメータの一部を変更したときに、複雑かつ多量の計算を実行しない限り設計の特性が評価できないことを意味しており、設計作業の信頼性、即応性を向上させ

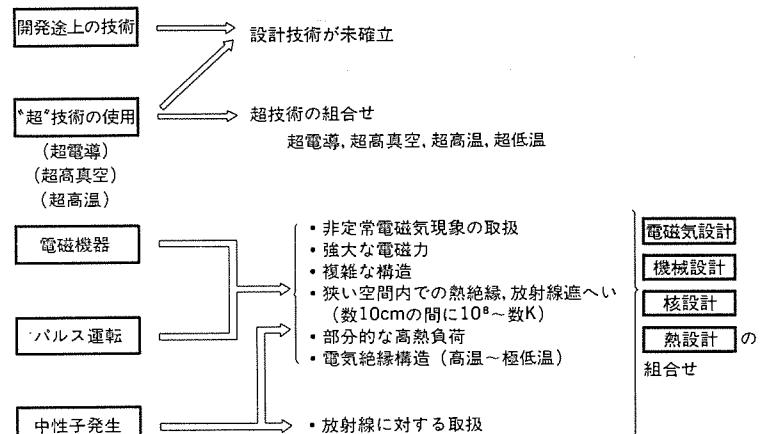


図 1. トカマク型核融合炉設計の特徴

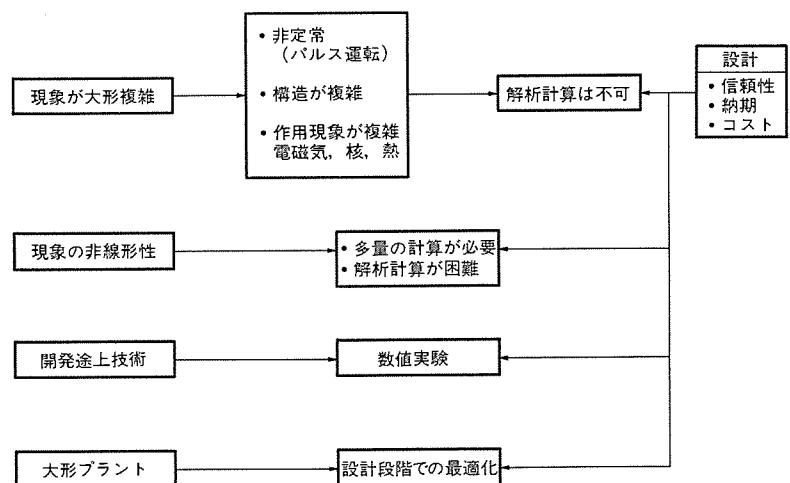


図 2. 核融合装置設計と電子計算

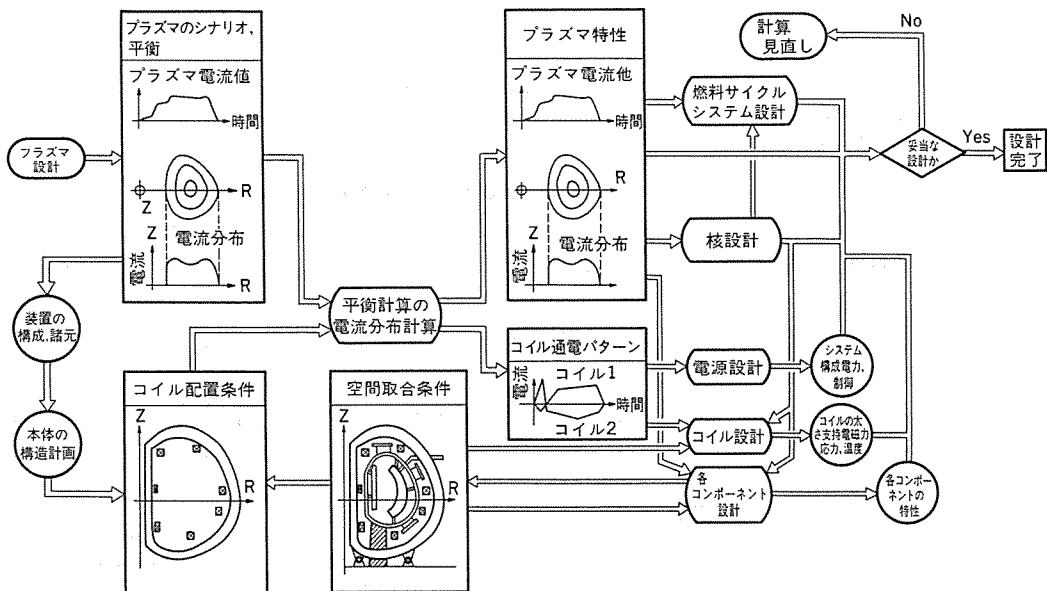


図 3. 核融合装置の設計手順

る意味から電子計算が不可欠である。

第3の理由は核融合装置の基礎となっている要素技術及び核融合そのものが開発途上にある点にある。したがって、核融合装置設計の過程で、例えば、自己点火プラズマの挙動、ブランケット特性、超電導コイルなどのように実機による技術的実績が無く、また試作品による試験データも不十分な状態で設計計算や特性評価を行うことがある。このような場合、数値実験による現象のシミュレーションが、設計の信頼性、時間及び費用の経済性の面で有効であり、この面からも電子計算は欠かせないものである。

第4の理由は核融合技術が急激に発達した結果、装置が加速度的に大形化している点にある。一世代前の核融合装置は実験室での、手作り的な装置で十分に意味のある実験ができた。しかし現在建設中の JT-60 規模になれば、設計・製作に約10年の歳月をかけ、また実験及び保守にも合わせて数百人のメンバーが必要とされる装置であり、従来の概念でいう実験装置というよりは、むしろプラントと考えるべき性格の装置である。したがって、核融合装置設計では設計段階から十分な最適化を行って費用及び工期の経済性を向上させなければならないが、このような作業に電子計算は不可欠である。

以上に述べたように、核融合装置の設計では信頼性、経済性及び設計効率の点から電子計算は不可欠である。

## 2.2 核融合装置の設計・解析作業と電子計算

核融合装置の設計手順といったものは、まだ確立されているわけではないが、図 3. にその一例を示す。ここでは、装置の目的に合わせたプラズマの設計、すなわちプラズマ主副半径、断面形状、プラズマ電流、軸上トロイダル磁場、運動シナリオなどを設定するところから設計を開始している。このような設計パラメータが決まれば、装置の構成、規模などが決まり、本体についての概略の構造計画ができる。この計画を基に、トロイダル、ポロイダル両磁場コイルの形状、配置を決定する。トロイダル磁場コイルは従来の装置では円形あるいは長円形が主であったが、将来の装置では電磁力が大きくなるので均一応力形と呼ばれるD形の形状が主となる。この形状は一種の積分曲線であり電子計算による数値計算

で具体的な形状が決定される。トロイダルコイルについては、その磁場分布、電磁力分布、その結果に基づく応力、熱特性などを解析する必要がある。ポロイダルコイルは、トロイダルコイル、真空容器、ブランケットその他との空間的干渉からその配置に制約がある。このような配置上の制約条件の下で所定のプラズマの平衡を得られるようコイルに対する電流配分及び通電パターンを解析する。この場合、各コイルの配置や巻数の制約条件から、所定のプラズマが生成できるとは限らないのでプラズマ特性を再評価し、場合によってはコイル位置や巻数などについて再設計する。

このように、プラズマ及びコイル系の設計から出発して、真空容器、ブランケット、遮へいなどの本体各コンポーネント及び燃料サイクルシステム、電源、排気系などの補機類について設計及び解析を進めて、その特性を評価し設計として妥当性をチェックする。この結果、設計として不適切な部分があればその原因を見定めて設計の改訂を行い完了させる。

以上に述べたように、核融合装置は相互に密接な関係がある多数のコンポーネントから構成されている。この点は、先に述べた多数の物理現象が共存するという特性と併せて、核融合装置の電子計算プログラムシステムを構成していく上で考えなければならない重要事項である。

## 3. 核融合装置設計の電子計算プログラムシステム

核融合装置設計の特徴及び電子計算の必要性は前述のとおりであるが、次に核融合装置設計に使用する電子計算プログラムあるいはプログラムシステムを開発するにあたっての留意点を述べる。

第1に留意すべき点としては、多種のコンポーネント及び物理現象が

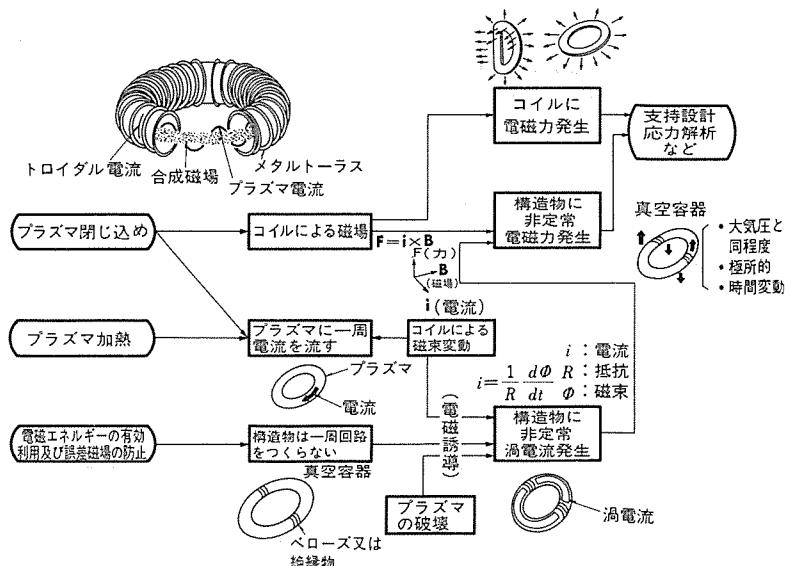


図 4. トカマク装置の電磁力 (コイル-真空容器系)

相互に関連して共存する点である。この事実は、磁場解析、回路解析、熱解析、応力解析といった単機能のプログラムのみでは設計・解析が不十分であることを意味している。すなわち、多種類のコンポーネントにまたがる多種類の解析を同時又は順次実行できるようなプログラムシステムが必要である。

一例として、トカマク装置の電磁力について考えてみる。説明の便宜上からコイル-真空容器系に限定した電磁力現象の概略を図4.に示す。図に示すように、トカマク装置のコイル及び真空容器には非定常な電磁力が作用するが、各々の電磁力を解析するには各コイルや真空容器に流れる電流、印加されている磁場分布などが必要であり、また計算された電磁力は応力解析などの荷重条件として使用される。ここで電流分布、印加磁場などは、プラズマ-コイル-真空容器系に対する回路解析、渦電流解析、磁場解析などから得られるものであり、原理的には単一機能のプログラムで解析可能である。しかし実際の設計作業において、このような解析を別個のプログラムで実行しようとした場合には、データの受渡しや整理の作業量が膨大となり設計の精度、信頼性及び効率が低下する。

第2には、核融合装置あるいはその要素技術が開発途上にあるため、設計に必要な一部の解析については、その解析手法が必ずしも明確ではない。あるいは進歩の過程にある点に留意しなければならない。このような問題については、既存の電子計算プログラムは存在しないので対象となる現象に対して解析モデルや基礎式などの設定から始めて、プログラムの開発を行う必要がある。プラズマ-壁相互作用、プラズマ-真空容器の電磁気的相互作用などは、核融合に固有な開発途上技術といえるだろう。

第3の留意点としては、計算結果のグラフ化、コンピュータによる作図、TSφを使用した対話形式の導入などがある。このような点は計算プログラムあるいは設計・解析作業の合理化、効率化の性格をもつものであり、必ずしも核融合装置設計・解析に使用する電子計算プログラムに固有のものではなく一般的な傾向ではあるが、核融合装置は技術としての歴史が新しく、また進歩の速度が速いので特に重視すべき点であろう。

#### 4. 三菱核融合開発室(MFC)の電子計算プログラムシステム

以上に、核融合装置設計と電子計算プログラムシステムの関係について述べた。以下には、MFCが使用している核融合装置設計用の電子計算プログラムシステムについて紹介したい。

核融合装置設計の範囲は多岐にわたっているが、我々としては核融合装置に関連するすべての分野の設計・解析が漏れなくカバーできるよう電子計算プログラムの開発・整備に努めている。図5.に、核融合装置本体の設計のためにMFCで開発・整備した電子計算プログラムを示す。

ここで示したプログラムシステム開発整備にあたって、応力解析、熱解析、核解析、図形処理などについては既存の汎用プログラムを多く使用することによって、プ

ログラム開発の効率化を図っている。本稿では、図5.に示すすべてのプログラムシステムのうち、いくつかの代表的なプログラムシステムとして、①コイル設計解析、②電磁気設計、③ブランケット設計、に関するプログラムシステムについて各々簡単に紹介する。

##### 4.1 コイル設計・解析プログラムシステム

コイルの設計・解析は核融合装置設計の最も基本となるもの一つであり、今までに多数のプログラムが開発されているが、比較的最近になって従来のプログラムを整理統合したプログラムシステムを完成し現在試用段階にあるが、その構造を図6.に示す。

図に示すように、このプログラムシステムではポロイダル及びトロイダル磁場コイルを同時に解析可能である。なお、図に示していないが、ヘリカルコイルについてもある程度の解析が同時にできる。ポロイダル磁

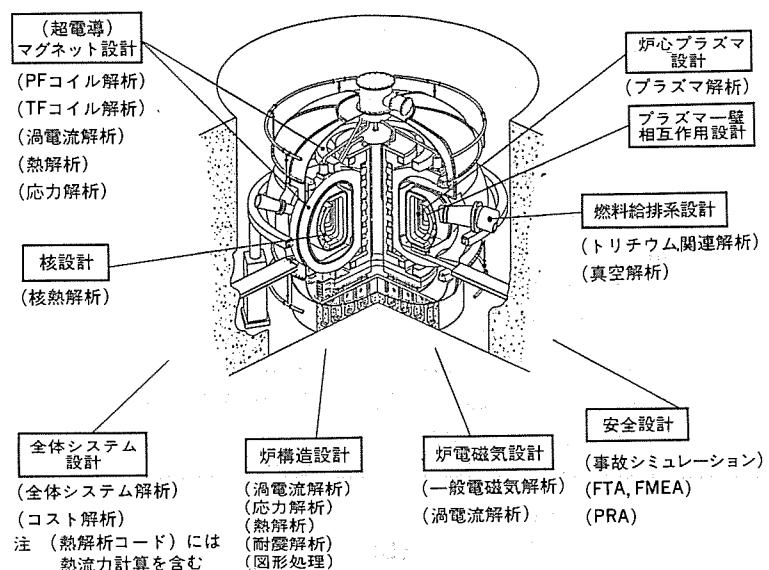


図5. 核融合装置の設計と解析

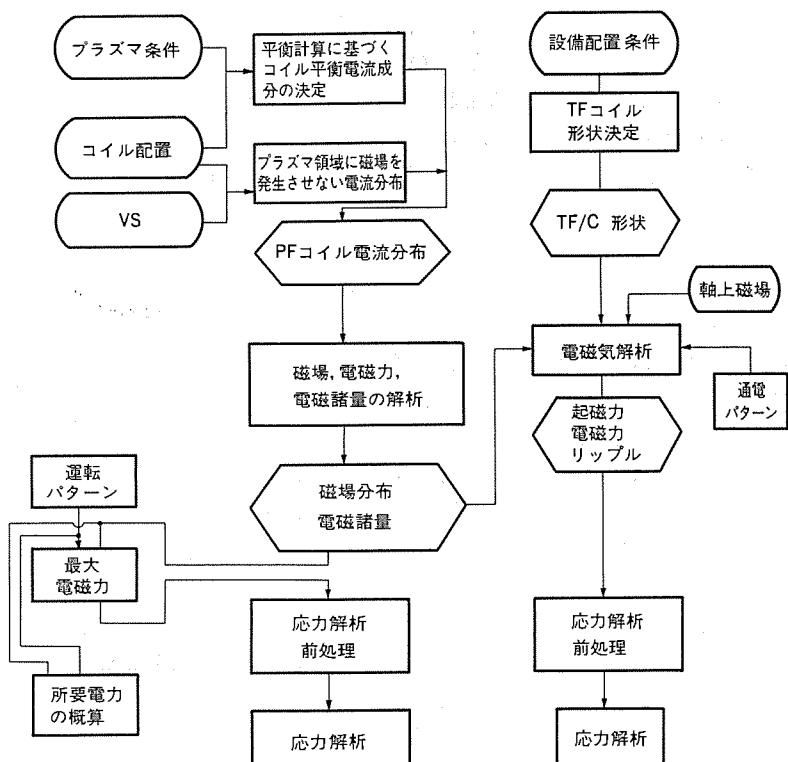


図6. コイル設計・解析プログラムの構造

場コイルについては、コイルの配置、プラズマの形状、電流分布及び必要ボルトセクを入力することにより、各コイルの通電電流を先ず計算する。次に、各コイルの通電電流に基づいて磁场、導体内最大磁场、電磁力、インダクタンスなどが計算される。この結果と別途入力される通電パターンを基にして、所要電力や電源設備容量及び各コイルの最大電磁力を求める。最大電磁力及び別途入力される応力解析のための条件、例えばメッシュ分割、境界条件、初期条件などに基づいてポロイダル磁场コイルの応力解析が実行される。

一方、トロイダルコイルについては形状決定からスタートして、通電電流、電磁力、磁场、磁场リップルインダクタンスなどの解析を経て、最後には応力解析を実行する。ここで、トロイダルコイルに印加されるポロイダル磁场は、ポロイダル磁场コイルの設計・解析の計算から受け渡される。このプログラムシステムは以上に述べたように、特に目新らしい解析内容を含んでいる訳ではないが、一連の作業を一括して実行可能である点、また計算機との対話形式を取り入れて解析の途中結果を見ながら設計を先に進めていくことができる点に特徴がある。

#### 4.2 電磁気設計

ここでいう電磁気設計とは、非円形断面プラズマの上下不安定性をブランケットのシェル効果とフィードバック制御によるポロイダル磁场によって抑制し、一方においてブランケットがプラズマのディスラップション時（プラズマの急激崩壊）の大きな電磁力に対して構造健全性を維持し、かつ所定の核的特性（例えばトリチウム増殖率）を確保せしめるような設計を意味している。ここに述べた意味での電磁気設計は、最近の実験炉設計で話題になっているものであり、その歴史は新しく設計・解析手法は必ずしも確立されたものではないが、我々は図7.に示すような解析手順を開発した。

まず、想定しているプラズマ及びブランケット構造に対して渦電流解析を行う。この結果として、プラズマの不安定性成長率が算出できる。この不安定性成長率は、プラズマが変動した場合にブランケットのシェル効果によって、どれだけプラズマの変動が抑制できるかを示すパラメータである。したがって、この不安定性成長率とフィードバック制御されるポロイダル磁场条件及びプラズマの変動条件を入力として、プラズマ位置制御のシミュレーションを行う。シミュレーション結果の一例を図8.に示すが、この解析の結果としてはプラズマ制御特性、フィードバック制御に必要な電源設備容量、電力などが出力される。一方、先に述べた渦電流解析結果と外部磁场との相互作用として電磁力が発生するが、この値はプラズマのディスラップションのような急激なプラズマ電流変化に対しては、極的に数十気圧を越える荷重条件となる。したがって、このような荷重条件に対して応力解析を行って構造健全性を確認しておく必要がある。このような、渦電流、電磁力及び応力解析プログラムシステムを図9.に示す。

なお、このプログラムシステムでは、応力解析プログラムとしてはNAS TRANを使用している。よく知られているように、ブランケットのシェル効果を大きくすればフィードバック制御の制御特性は向上し、フィード

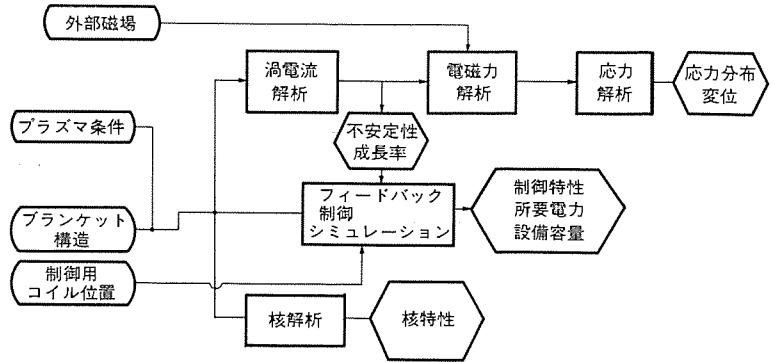


図7. 電磁気設計のフロー

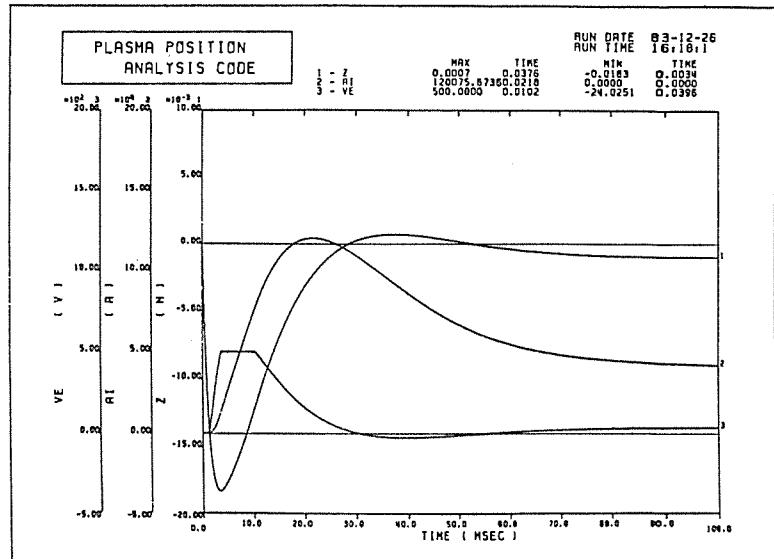


図8. プラズマ位置制御シミュレーション結果の一例

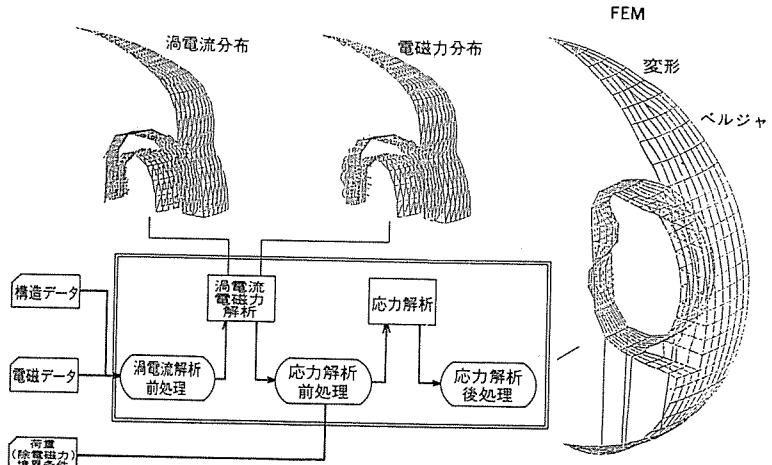


図9. 渦電流、電磁力及び応力解析プログラムシステム

トロイダルコイル用の電源設備容量や電力も小さくなる。しかし一方では、渦電流値すなわち電磁力値が大きくなり構造健全性が問題となる。したがって、設計作業はパラメトリックにあるいは試行錯誤的に何度も繰返しとなる。このため、このプログラムシステムでも各々の解析間のデータ授受をプログラム間で自動的に行わせ、また、できる限り対話形式とすることによって設計効率を向上させている。

一方、電磁気現象とは直接の関係は無いが、ブランケットの核的特性についても考慮しなければならない。すなわち、ブランケットのシェル効果を増大させるにはブランケットに誘起される渦電流を減衰させないように銅などの電気的良導体を使用するが、銅は中性子の吸収特

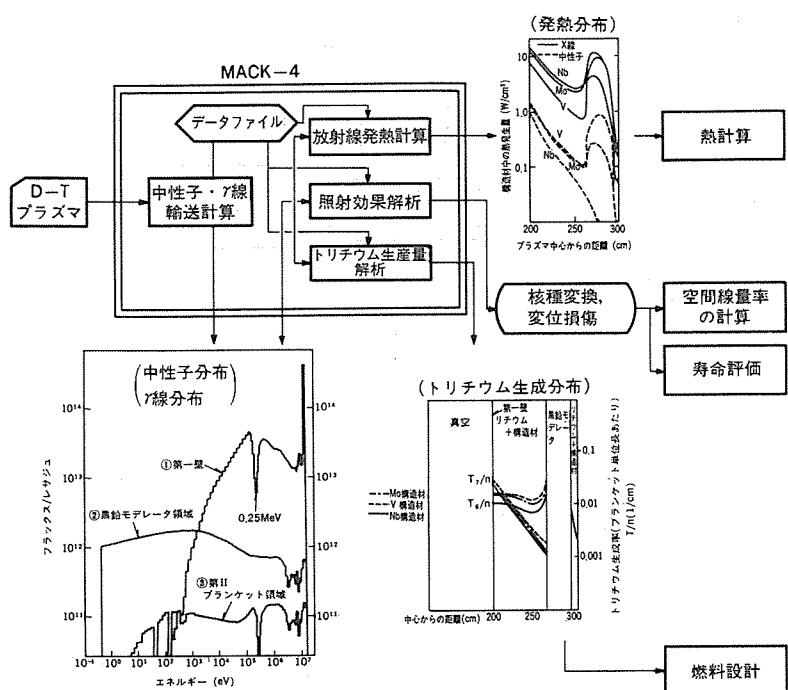


図 10. 核熱解析 プログラムシステム

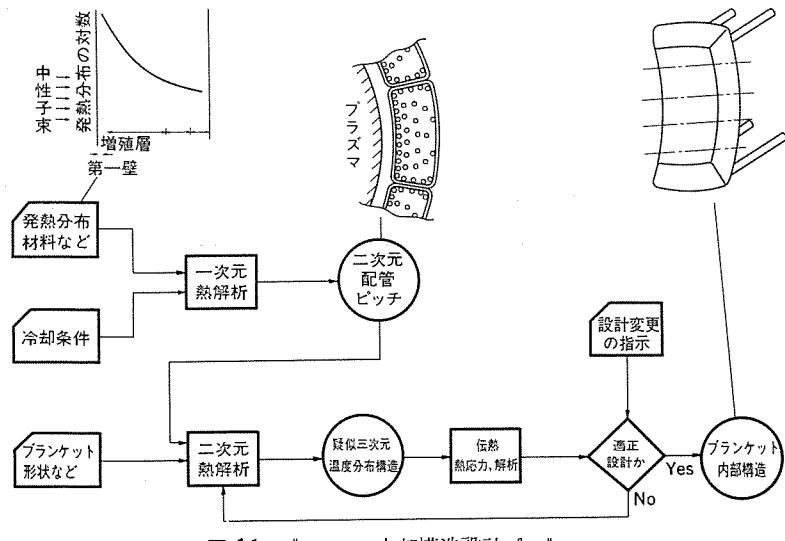


図 11. ブランケット内部構造設計 プログラム

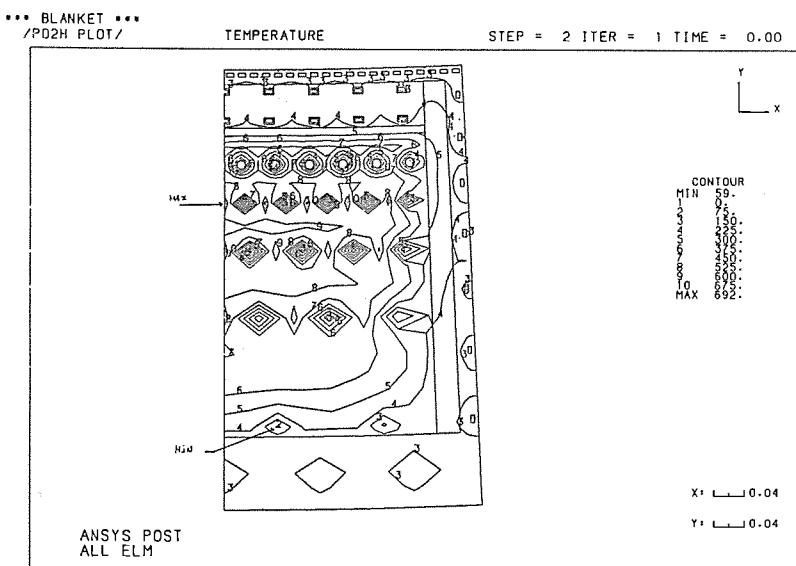


図 12. ブランケットの熱応力解析例 (実験炉 ブランケットの温度分布)

性があるためトリチウム増殖率を下げる。このような事情から、電気的良導体でかつ中性子増倍作用のある鉛やベリリウムをブランケット内に置いてシェル効果と核特性の両立を図ろうとしている設計が多い。すなわち、核解析も核融合装置の電磁気設計の一部となっている。核解析についてのプログラムシステムの概要を図10.に示す。

以上に述べた電磁気設計は、実験炉規模又はそれ以上の装置を対象としたものであるが、より小形の装置に対しても上に述べたプログラムシステムの一部、例えば渦電流、電磁気、応力解析プログラムシステムは適用可能であり、実際の設計にも多用している。

#### 4.3 ブランケット設計

ここでいうブランケット設計とは、主として熱及び構造設計を意味している。よく知られているように、ブランケットはプラズマ内の核融合反応で生成した14 MeV中性子を熱化してエネルギーを取り出し、また燃料となるトリチウムを再生産する機能をもっている。このようにブランケットは将来の核融合炉では中心的なコンポーネントであるが、現在までのところ三次元的な熱及び構造解析は必ずしも十分には行われてはいない。これは、ブランケットの構造が比較的複雑であり、また多種類の物理現象が共存しているためと考えられる。我々はこの問題に対してプログラムシステムを開発したので以下にその概要を示す。

まず、図10.に示した核解析プログラムシステムを使用してブランケット内の発熱分布を計算する。この計算結果とブランケットの材料及び冷却条件、例えば冷却材の出入口温度、流速などを入力として一次元の熱エネルギー・バランス計算から冷却配管の分布を決定する。すなわち図11.に示すように、ブランケット内の核発熱分布はプラズマからの距離に対して指數関数的に変化する。したがってブランケット内の冷却配管の配置はプラズマに近い側では密に、遠い側では疎に配置しなければならず、冷却配管1本あたりの除熱量とその周辺部の核発熱量がバランスするだけの面積を計算して、この面積から配管ピッチを決定する。

次に、以上に述べたような断面内での二次元の温度分布解析を行う。この温度分布解析を配管に沿って何枚もの断面で行うことによってブランケット内の三次元的な温度分布データを得ることができ、このデータに基づいて三次元熱応力解析が可能となる。ここでの熱応力解析には汎用プログラムANSYSを使用している。以上に述べたブランケット熱応力解析プログラムシステムの概要を図11.に、また結果の一例を図12.に示す。

#### 5. むすび

核融合装置設計にとって、電子計算は不可欠であり、その必要度は他の工業製品の設計に比較して、より大きいと考えられる。これは核融合装置が多種類の物理現象とコンポーネントから成立している点、及び急激に発達している技術分野であるため経験技術に頼れないこ

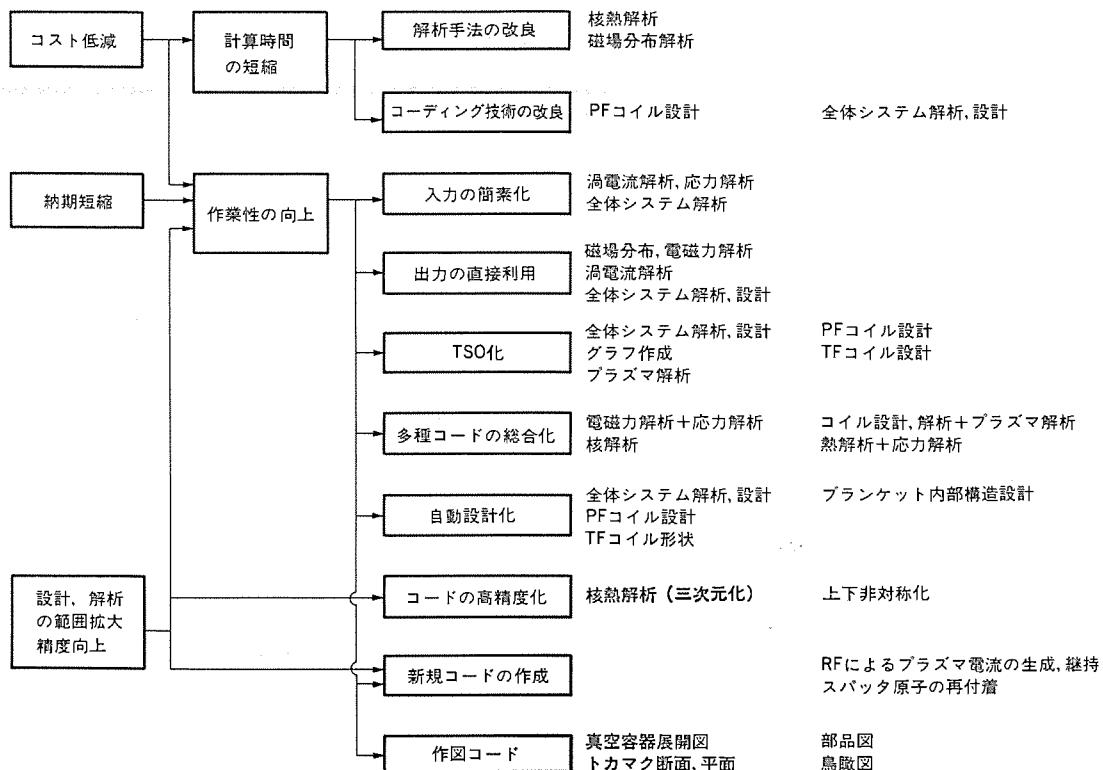


図 13. プログラムの開発・整備の考え方

とに主な原因がある。

一方、核融合装置設計に必要な電子計算プログラムは単機能の解析を行うのみでは不足であり、いくつかのコンポーネントにまたがる多種類の物理現象を同時に解析できなければならず、むしろプログラムシステムとでも呼称される性格をもっている。また、核融合装置が現在開発途上の技術である点から、解析モデルの設定、基礎式の導出からプログラム作成を開始しなければならない問題が多数ある。

三菱核融合開発室では、関係各位の御指導、御協力を得てあらゆる核融合装置の設計を高品質かつ迅速に行えるように核融合設計・解析用のプログラムシステムの開発整備に努めてきており、現状では核融合装置設計に必要な解析作業の大部分が電子計算プログラムとして開発整備できた段階である。しかし核融合装置設計技術の進歩の速

度は速く、新規プログラムの開発は常に必要不可欠である。プラズマによってスパッタされた原子の再付着、RFによるプラズマ電流の生成、維持などはこの種の問題の例といえるだろう。一方、解析作業をより高品質に、また迅速に実行するためのプログラム開発整備も不可欠である。プログラムのシステム化、結果の図形表示化、対話形への改良などがこの種の問題の例といえよう。このような電子計算プログラムの開発整備の考え方を図 13. に示す。

以上に核融合装置設計に関わる電子計算及び電子計算プログラムについて述べたが、今後とも電子計算プログラムの開発整備に一層の努力を続けて、より高品質の核融合装置設計を効率よく行えるように図りたい。

# 実験装置“逆磁場テータピンチ”

八十島義行\*・植田至宏\*・笹尾博之\*\*・上野昇\*\*・田中俊秀\*\*

## 1. まえがき

核融合装置の開発に必要な設計データ、特にプラズマの発生・制御、プラズマ診断に関する基礎データを得るために、“逆磁場テータピンチ”を設置し、プラズマ実験を行っている。逆磁場テータピンチは比較的簡単に高温・高密度のトーラス状のプラズマを発生することができ、この装置の特長は次のとおりである。

- (1) プラズマ計測を容易にできるコイル構造である。
- (2) コイルの長さなどパラメータが可変の構造である。
- (3) 逆磁場用のコイルを別に設けて、電源の運転を容易にしている。
- (4) ターボ分子ポンプとクライオポンプの使用により、超高真空を達成できる。
- (5) 制御系にマイクロプロセッサを使用するとともに、信号伝送系に光ファイバを使用し、ノイズの低減と安全対策を実施している。

この論文では、装置本体、真空排気系、電源系、制御・計測系の概要について述べる。

## 2. 装置の概要

### 2.1 逆磁場テータピンチ装置

テータピンチは、磁力線が開いた開放系に属する。1ターンのコイルにコンデンサ放電により立上りの速い電流を流して、プラズマを発生・圧縮し、高温・高密度のプラズマを得る装置である。

最近、テータピンチ磁場と逆方向にあらかじめ磁場を印加した状態でプラズマを発生させ、逆磁場を捕そくさせた上で主放電を行うと、磁力線のつなぎ替え (reconnection) が起り、図1に示すような磁力線の閉じたトーラス状プラズマ<sup>(1)(2)</sup>が発生できることが明らかにされた。このプラズマは、コンパクトトーラスと呼ばれ、高温、高密度でしかも従来のテータピンチより約数十倍も閉じ込め時間が長くなることから内外で注目を集めている。

### 2.2 本体の概要

図2及び図3にそれぞれ逆磁場テータピンチ装置本体の写真を示す。また、表1に装置の主要諸元を示す。本体は、テータピンチコイル、逆磁場用のヘルムホルツコイル、コンデンサからケーブルでコイルに給電するた

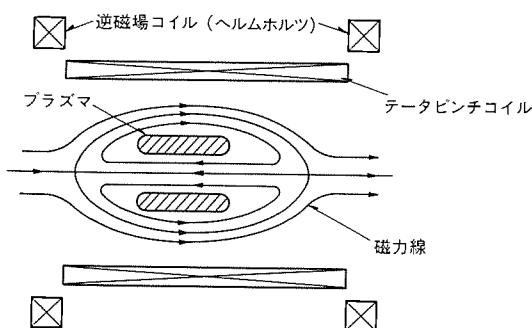


図1. 逆磁場テータピンチ原理図

めの集電板、プラズマ容器である石英放電管、真空排気系及び架台から構成されている。

### (1) 磁場発生用コイル

テータピンチコイルは1ターンのアルミ製で、内径174 mm、外形240 mm × 240 mm、長さ1,000 mmである。コイルは33分割されているとともに一つのコイルは上下に2分割されている。1本のコイル幅は20 mm、コイル間隔は10 mmである。このコイルの間隔が観測窓となり、窓高さは150 mmで各種計測が行いやすい構造になっている。また、集電板の先端でコイルのみが着脱可能であり、放電管を動かすことなくコイル長を変えることができるとともにミラー磁場配置に

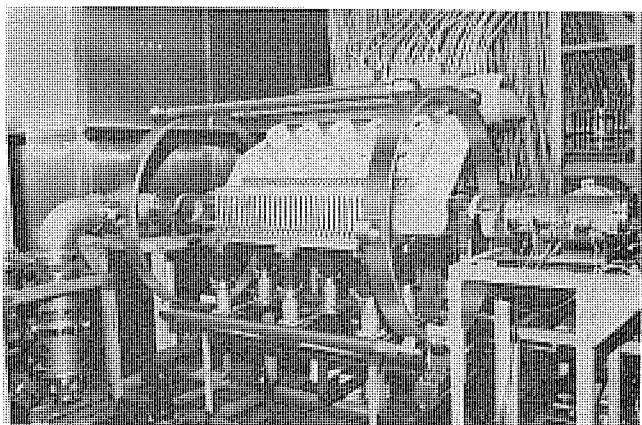


図2. 逆磁場テータピンチ装置

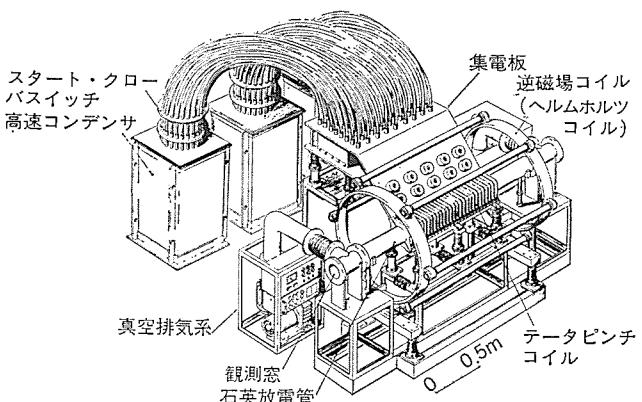


図3. 逆磁場テータピンチ装置説明図

表1. 装置主要諸元

項目	仕 様
高速コンデンサ	45 kV, 45 $\mu$ F
逆磁場コンデンサ	15.6 kV, 1 mF
予偏加熱コンデンサ	60 kV, 0.9 $\mu$ F
テータピンチコイル内径 (mm)	174
テータピンチコイル長さ (mm)	1,000
テータピンチ磁場強度 (kG)	10
テータピンチ磁場立ち上り ( $\mu$ s)	2.5
逆磁場強度 (kG)	1

することもできる。このようにコイルの各種「パラメータ」を容易に変えることができ、実験に便利な設計になっている。

逆磁場発生用のヘルムホルツコイルは、1ターンのステンレス製で、内径1,000 mm、幅100 mm、コイル間1,200 mmであり、テータピンチコイルとは別に設けることによって、電源の運転を容易にしている。更にクローバの時点で逆磁場を反転させテータピンチ磁場に重畳することによって、クローバ以降の磁場の制御を行うこともできる。

後述のように、テータピンチコイル、ヘルムホルツコイルの最大電流は、それぞれ約1 MA、約70 kAである。このときにコイル、集電板、コイル間に働く電磁力を計算し、それを基にコイル、集電板の応力分布を計算した。機械的に一番厳しい集電板の最大変位は、約0.67 mm、引張応力の最大値は4.75 kg/mm<sup>2</sup>で、アルミ材を使用できることがわかる。

## (2) 放電管及び真空排気系

放電管は、石英製で外径160 mm、長さ2,000 mmである。ステンレスの真空配管との接続部は、バインのOリングでシールされている。真空排気系は、放電管の両側に設置した実効排気速度520 l/sのターボ分子ポンプと1,000 l/sのクライオポンプから構成されている。

放電管内の最高到達真空度 $P$ (Torr)は、真空系内で単位時間に発生するガス量 $Q$ (Torr·l/s)と配管のコンダクタンスも考慮したポンプの有効排気速度 $S$ (l/s)から、 $P=Q/S$ で求めることができる。この装置の石英管(160φ)、ステンレス配管(6インチ)の内面積と各材料のガス放出度から計算すると、1時間後の $Q$ は $7.5 \times 10^{-5}$  Torr·l/sとなる。また、排気系全体の有効排気速度 $S$ は、石英管、配管の長さ・形状から求めたコンダクタンスとポンプの有効排気速度から、330 l/sとなる。したがって、この放電管内の1時間後の到達真空度は $2.3 \times 10^{-7}$  Torrとなる。このときの真空系のベーキングは、リボンヒーターを放電管などに巻き付けて行っている。ベーキング温度は、吸着水分を除去するために100°C強である。

実験用の水素ガスは、放電管内の真空度が上記値に到達後、ピエジ電磁弁(1 Torr·l/100 V·s)で所定の圧力まで導入する。

## 2.3 電源回路と磁場波形

図4に逆磁場テータピンチ装置の電源回路図を示す。テータピンチ用の高速コンデンサとして、低内部インダクタンスの45 kV, 15 μF, 15 kJのコンデンサを3台計45 μF・45 kJを備えている。逆磁場は、15.6 kV, 15 kJのコンデンサ50台計1 mF, 121 kJから供給される。予備加熱

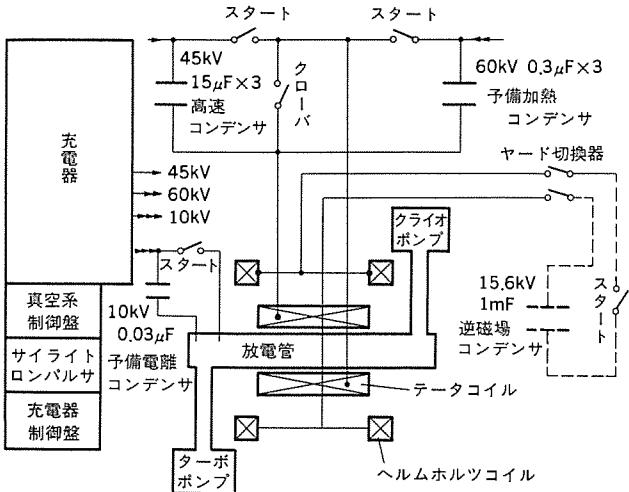


図4. 電源回路図

実験装置“逆磁場テータピンチ”・八十島・植田・笹尾・上野・田中

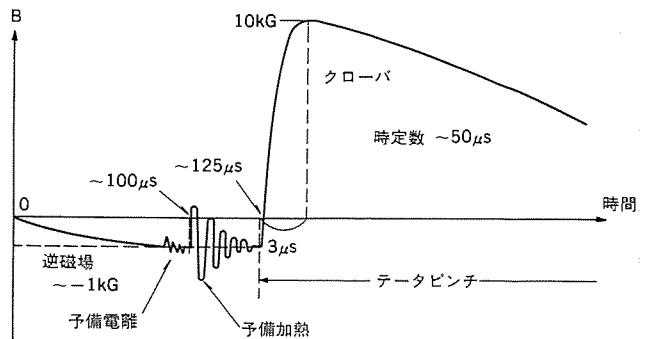


図5. 磁場波形

用としては、60 kV, 0.3 μFの高速コンデンサ計3台、540 Jを備えている。更に、放電が点火しにくい場合を考え、予備電離ギャップ放電用として、10 kV, 0.3 μF, 15 Jのコンデンサも用意している。

高速コンデンサのスタートスイッチは、電界ひずみ形圧力ギャップである。クローバスイッチは、デカップル用に低気圧ギャップを直列に接続した電界ひずみ形圧力ギャップである。また、予備加熱コンデンサのスタートスイッチはトリガトロン形の圧力ギャップである。すべてのギャップには、乾燥空気を所定の圧力で流している。また、低速コンデンサのスタートスイッチには、真空遮断器を使用している。

この装置のコンデンサ電源からコイルに流れる電流を求めるために、図4の電源回路の等価回路を求めた。コイル、集電板などの幾何学的形状、同軸ケーブルの本数・長さ、更に表皮効果も考慮して、回路のインダクタンス、抵抗を求めた。それらにコンデンサ、スイッチの内部インダクタンスと抵抗を考慮を入れた等価回路から、テータピンチコイルとヘルムホルツコイルに流すことのできる最大電流を求めると、それぞれ約100 kHz・1 MAと約5 kHz・70 kAである。

図5に放電管中心部での磁場波形を示す。テータピンチコイルによる放電管中心部での最大磁場強度は、10 kGで立上がり2.5 μs(100 kHz)である。クローバをかけることにより、波尾を数十 μs程度まで延長できる。ヘルムホルツコイルによる逆磁場は、最大1 kGで立上がり50 μsである。また、予備加熱放電の周波数は、400 kHzである。

## 3. 制御・計測系

逆磁場テータピンチ装置全体システムのブロック図を図6に、そしてその中の制御室の写真を図7に示す。制御室は二重にシールドされている。しかも、制御室と本体装置間は、ノイズ低減と安全対策のため、有線の接続ではなくすべて光ファイバで接続されている。制御は、回路の選定と安全監視を行うシステム管理CPU-A、電源の充放電・シーケンス制御を行う実験制御CPU-Bとデータ収録CPU-Cの三つの機能に分割されている。

制御・計測システムには、16ビットのマイクロプロセッサを計6個使用して並列処理を行っている。実験制御を行うCPU-Bは4ユニットあり、4人が同時に実験可能である。制御室には、32ビットのスーパミニコンピュータを設置し、データ解析やオフラインの電磁界解析、構造解析などにも使用できる。また、コンピュータへの入力はすべて、CRTを用いた対話形式となっている。

図8に逆磁場テータピンチ装置の制御・計測系の詳細ブロック図を示す。CPU-Bからの制御信号と各機器からのデジタルモニタ信号は、1 kbsの電気/光(E/O)変換器、光/電気(O/E)変換器で、アナログのモニタ信号は帯域300 Hzの周波数変調式E/O、O/E変換器

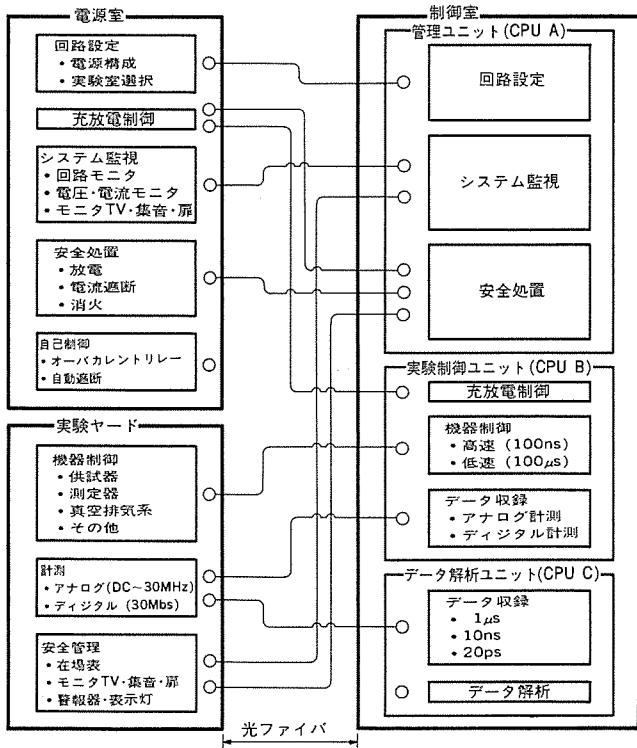


図 6. システムブロック 図

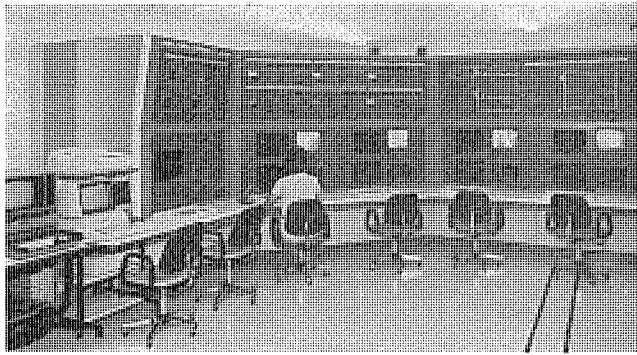


図 7. 制御室

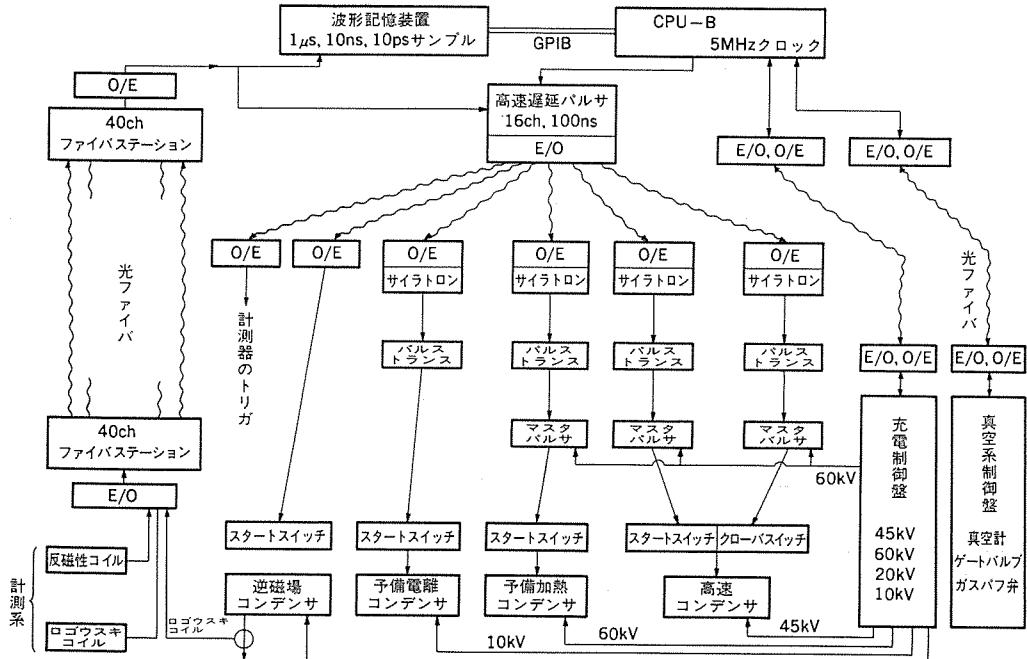


図 8. 制御・計測系 ブロック 図

を通して入出力される。同期制御は、CPU-B 内蔵の  $100\ \mu\text{s}$  のタイマと、CPU-B 制御の高速遅延パルサ (16 ch, 100 ns 間隔) によって行われる。遅延パルサの出力信号は、立上り  $30\ \text{ns}$  の光パルスに変換され、サイラトロンパルサやレーザなどの計測機器のトリガを行う。反磁性信号など計測系のアナログ信号は、遅い信号の場合は帯域  $300\ \text{Hz}$  の周波数変調方式 E/O 変換器、速い信号の場合は振幅変調方式 E/O 変換器で光信号に変換される。更にこれらの信号は、40 チャネルのファイバステーションを通して、波形記憶装置に記憶後 CRT 面に表示されたり、必要なデータ処理が行われる。

実験は、すべて制御室からキーボード操作で光ファイバを通じて行う。まず、ターボ分子ポンプ、クライオポンプで放電管を  $\sim 10^{-8}\ \text{Torr}$  程度まで真空排気を行う。所定の真空中に達するとゲート弁を閉じ、ガスバフ弁を開き、放電管内を希望の真空中に自動調整する。同時に、低速・高速・高速・予備加熱・予備電離・コンデンサ、マスタパルサの充電を行う。充電完了後、低速コンデンサのスタート指令を出す。ヘルムホルツコイルに設置したロゴウスキコイルが電流を検知し、光ファイバを通じて制御室内の 16 チャネル高速遅延パルサに信号が送られる。あらかじめ設定したバイアス磁場になると、遅延パルサはセットされた時間シーケンスの光信号を光ファイバで本体側の各サイラトロンパルサに送り、各マスタパルサを駆動して図 5. のような磁場を発生する。

#### 4. むすび

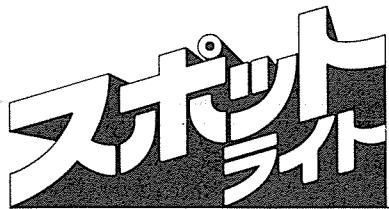
核融合技術の研究設備として、プラズマ実験装置“逆磁場 テータピンチ”を設置し、プラズマ実験を行っている。

この装置のプラズマパラメータは、ロスアラモス研究所の逆磁場 テータピンチ装置 FRX のスケール則など<sup>(2)(3)</sup>から、電子温度  $100\sim200\ \text{eV}$ 、イオン温度  $100\sim300\ \text{eV}$ 、電子密度  $2\sim3\times10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 、閉じ込め時間  $10\sim30\ \mu\text{s}$  と推定している。

今後、この装置を用いて高温・高密度プラズマの診断技術の開発を行うとともに、トカマクなどの核融合実験装置の開発に必要な種々の設計データの集積を行う予定である。

#### 参考文献

- (1) 平野：日本物理学会誌 36, 52 (昭 51)
- (2) W. T. Armstrong et al : Phys. Fluids 24, 2068 (昭 56)
- (3) T. Minato et al : Proc. 9 th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclea Fusion Research, Baltimore (1982)



# 12GHz直接放送衛星受信システム用 超低雑音GaAs FET MGF1404

このたび三菱電機では、12GHz直接放送衛星（DBS）システム用として、高性能・高品質な超低雑音GaAs FET MGF1404（NF=1.6dB@12GHz）の量産化に成功しました。

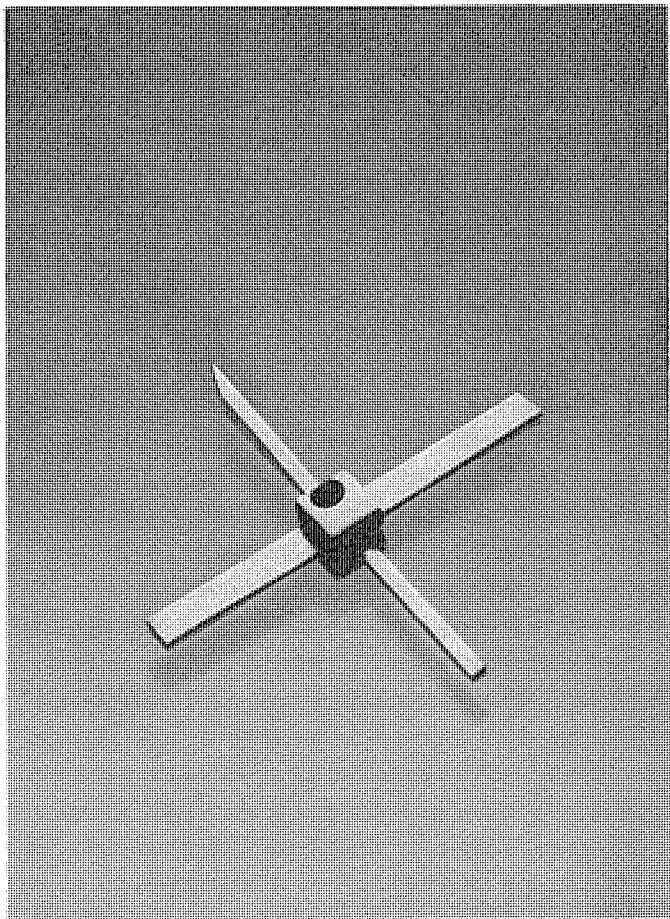
これまでの実績あるGaAs FET（ガリウム砒素電界トランジスタ）製造技術に加え、ソース・ゲート間低減化技術、サブミクロンゲート形成技術、結晶選別技術などにより実現したものです。

このMGF1404は、DBSシステム用受信コンバータ（BSコンバータ）はもとより、4GHz TVRO（T.V. Reciver Only）用アンプ、通信機用アンプなど種々のマイクロ波装置の高性能化に不可欠なデバイスとして注目を集めています。

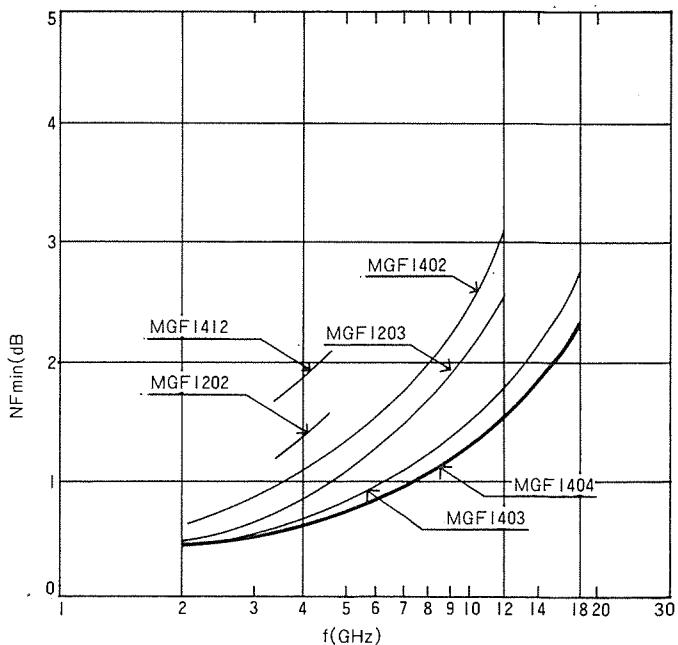
MGF1404が生み出された市場背景には、本格的ニューメディア時代の幕明けといわれるDBS用放送衛星BS-2の打ち上げ成功による新しい情報システム化への対応があげられます。この衛星の目的はNHK放送の難視世帯の解消ですが、5年後には大型衛星BS-3が打上げられ、民間放送サービスも計画されています。

DBS放送は赤道上約3万6000kmに打上げられた静止衛星を介して行なわれます。地上局から14GHzで送信され、弱まった信号は衛星で增幅され、12GHzの周波数に変換された後、地上に再び送信されますが、到達するまでに減衰し、各家庭で受信される時には微弱な電波になります。この電波をキャッチするには大型アンテナか、高性能低雑音受信機が必要となります。DBS放送は一般家庭用ですから小形アンテナと高性能低騒音受信コンバータが望されます。この受信コンバータの性能は内蔵のGaAs FETによって決まりますので、その低騒音化は不可欠となります。さらに一般消費者向ということから低価格化が要求されます。

MGF1404は、このようなニーズに即応したニューメディア時代にふさわしい新デバイスといえましょう。このデバイスで2段または3段アンプを構成すれば、総合雑音指数2.5dB以下の12GHzBSコンバータが実現します。



超低雑音GaAs FET性能比較



# 加圧水型軽水炉用超音波流量計

池永良知\*・松本英三\*・尾崎楨彦\*\*・友田利正\*\*・小田稔\*\*\*

## 1. まえがき

超音波流量計は、流体中を伝播する超音波の速さが流体流速に依存して変化することを利用しておる、低流量から高流量に至るまで出力直線性に優れ、また出力経時安定性に優れているということが一般的な特徴として挙げられる。しかし、従来実用に供せられている超音波流量計は対象が主として常温水に限られており、高温流体に適用できる流量計とするには新たな開発が必要であった。

これまでに液体ナトリウムという高温流体が冷却材である高速増殖炉(FBR)に適用できる流量計の開発が、動力炉核燃料開発事業団と三菱電機(株)との間で進められてきた。FBR冷却系統用超音波流量計は所期の成果を収め<sup>(1)(2)</sup>、既に実験炉「常陽」二次系において主電磁流量計の較正装置として使用された実績があり、原型炉「文珠」でも同様の目的で二次系に使用が計画されている。

今回、この高温ナトリウム用流量計に関する成果をもとに、加圧水型軽水炉(PWR)給水系統における高温高圧水流量計測に適用できる超音波流量計の開発を実施した。開発にあたり、特に検討を要した点は水中音速が水温水圧により大きく変化し、これが超音波による流量計測に誤差をもたらすのをいかに補正するかであった。そのため、高温高圧水中での音速の精密測定を行い、PWR運転条件下での給水温度、圧力変化に伴う音速変化に対する超音波流量計出力の補正法を新しく開発した。常温常圧水による較正試験を含む各種基礎試験<sup>(3)</sup>、更にPWR実プラントでのフィールド実証試験を実施し<sup>(4)</sup>、この超音波流量計はPWR給水系統に適用し得ることが検証できた。以下、この超音波流量計の特長を概説する。

(1) 配管外壁に伝音材としてガイド棒を取り付け、その先端に超音波送受信子をマウントしている。ガイド棒先端は高温流体から離れており、送受信子として実績の豊富な常温用のものが使用可能となり、また送受信子は配管保温材外にあるため、その交換などの保守性に優れている。また、ガイド棒は配管に溶接で取り付けられているので、原子炉運転中の配管振動、熱サイクルの中でも極めて安定した超音波の送受信が可能である。

(2) 流体の流れ方向に対する上下流2方向の超音波伝播時間差を直接測定するという時間差直接測定方式を採用している。このため測定周期(数ms)ごとに流体流量(流速)が求められ、応答時間が極めて早く、また従来のシングラウンド方式とは異なり、超音波の送受が独立に制御されているので、流体中の異物、気泡混入による超音波送受信の停止は起らず、これらの妨害物に対して強い耐性をもっている。

(3) 超音波送受信を1回ごとに切り換えるという切換送信方式により、ガイド棒間温度アンバランスなどによる流量計測精度への影響を除去している。

(4) 流体に温度、圧力変化が生じても流量計出力に誤差が生じないような温度・圧力補正法を開発し、これを流量計回路部に組み込んであるため、測定時の流体温度、圧力情報を必要とせず流量計単

独で出力に対する温度・圧力補正が実現されている。

本稿では、このように優れた特長をもつ新しい超音波流量計について、その計測方式、システム構成・機能、この開発にあたっての各種基礎試験、プラント実証試験などについて述べる。

## 2. 計測方式

超音波流量計は、流体中を伝播する超音波の速度が流体流速に依存して変化することを利用しておる。つまり、超音波が流体中を伝播する際、流れに沿った方向、すなわち下流方向に伝播する超音波の伝播時間と、流れに逆らった方向、すなわち上流方向に伝播する超音波の伝播時間との間に伝播時間差が生じ、その伝播時間差が流体流速に比例することを利用して流体流速を求めようとするものである。

図1に示すように、配管内径を $d$ 、流体流速を $V$ 、配管壁と流体との境界での超音波伝播径路との角度を $\theta$ 、超音波の静止流体中の音速を $c$ とすると、下流方向に伝播する超音波の流体中での伝播時間 $t_{WD}$ は、

$$t_{WD} = \frac{d}{(c + V \cos \theta) \sin \theta} \quad (1)$$

と得られ、同様に上流方向に伝播する超音波の伝播時間 $t_{WU}$ は、

$$t_{WU} = \frac{d}{(c - V \cos \theta) \sin \theta} \quad (2)$$

となる。式(1)、式(2)の差をとり、流体中での超音波の伝播時間差を $\Delta t_W$ とおくと、流体流速 $V$ は、

$$V = \frac{\tan \theta \cdot c^2}{2d} \Delta t_W \quad (3)$$

と得られるというものである。

### 2.1 時間差直接測定方式

この超音波流量計は伝音材としてガイド棒を用いている。ここで、図1におけるガイド棒1体あたりの超音波伝播時間を $\tau_0/2$ とおくと、下流方向に伝播する超音波の送信から受信までの伝播時間 $t_D$ は、

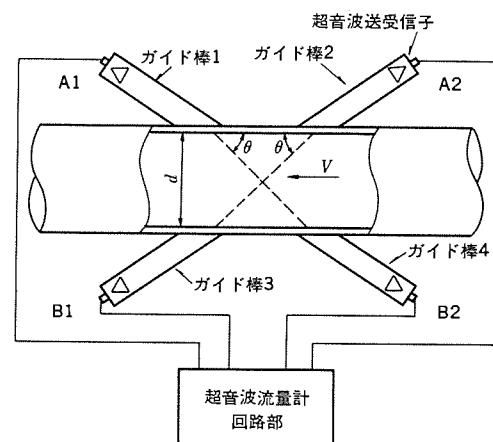


図1. 超音波流量計概念図

$$t_D = \frac{d}{(c + V \cos \theta) \sin \theta} + \tau_0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、上流方向に伝播する超音波伝播時間  $t_U$  は、

$$t_U = \frac{d}{(c - V \cos \theta) \sin \theta} + \tau_0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。式(4)、式(5)から流体流速を求める

$$V = \frac{d(t_U - t_D)}{2 \sin \theta \cdot \cos \theta (t_D - \tau_0) (t_U - \tau_0)}$$

となる。ここで、 $(t_U - t_D)$  は伝播時間差であり  $\Delta t$  とおく、また一般には  $(t_D - \tau_0) \gg \Delta t$  であり、 $(t_D - \tau_0) \approx (t_U - \tau_0)$  とおいてよく、上式を整理すると、

$$V = \frac{d}{\sin 2\theta (t_U - \tau_0)^2} \Delta t \quad \dots \dots \dots (6)$$

と得られ、ガイド棒を用いている場合についても、流体流速は超音波の伝播時間及び伝播時間差を測定することによって求めることができる。時間差直接方式とは、この伝播時間、伝播時間差を超音波の送信、受信の度ごとに測定しようとするものである。これらの時間計測を相対精度 0.1% 以内で測定し得る回路を開発した。したがって、この超音波流量計は極めて早い応答時間で高精度に流体流速を求めることが可能である。

## 2.2 切換送信方式

この超音波流量計がガイド棒を用いていることは先に述べたが、ここで 2 対 (4 本) のガイド棒温度分布にアンバランスが生じたとする。ガイド棒中の音速の温度依存性によって、上流方向、下流方向の超音波伝播時間が変化する。すなわち、ガイド棒 1 本あたりの超音波伝播時間を等しいとおいて流体流速を求めた式(6)において誤差が生ずることとなる。この対策として、上流方向、下流方向への送信の向きを交互に切り換えて、そのときの伝播時間差の平均をとることによって、この誤差を除去しようとするものである。ここで、図 1. に示したガイド棒 1 からガイド棒 4 のそれぞれの超音波伝播時間を  $\tau_1$  から  $\tau_4$  とおくと、送受信子 A 系統から B 系統へ超音波を送信したときの超音波伝播時間  $t_D$ 、 $t_U$  及び伝播時間差  $\Delta t$  は、

$$t_D = \frac{d}{(c + V \cos \theta) \sin \theta} + (\tau_2 + \tau_3) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$t_U = \frac{d}{(c - V \cos \theta) \sin \theta} + (\tau_1 + \tau_4) \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\Delta t = \Delta t_W + (\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 + \tau_4) \quad \dots \dots \dots (9)$$

となる。次に切り換え後、すなわち送受信子 B 系統から A 系統へ送信した場合の超音波伝播時間  $t_{D'}$ 、 $t_{U'}$  及び伝播時間差  $\Delta t'$  は、

$$t_{D'} = \frac{d}{(c + V \cos \theta) \sin \theta} + (\tau_4 + \tau_1) \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$t_{U'} = \frac{d}{(c - V \cos \theta) \sin \theta} + (\tau_3 + \tau_2) \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$\Delta t' = \Delta t_W - (\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 + \tau_4) \quad \dots \dots \dots (12)$$

となる。式(9)、式(12)から平均伝播時間差  $\bar{\Delta t}$  を求めると、

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t + \Delta t'}{2} = \Delta t_W \quad \dots \dots \dots (13)$$

と得られる。式(13)にはガイド棒中の超音波伝播時間が含まれていないので、原理的にガイド棒間温度アンバランスの影響が除去されたことになる。また、同様にこの切換送信方式によりガイド棒寸法アンバランス、超音波受信波高アンバランスによる影響も除去している。

## 3. 温度・圧力補正法

この超音波流量計においては、超音波伝播時間を測定しているので、流体中での音速の温度依存性の影響は既に部分的には補正されたものになっている。しかし、式(6)における  $d$ 、 $\theta$ 、 $\tau_0$  も流体温度により変化するため、高精度の超音波流量計を実現するためには、これらすべての値を知る必要がある。しかし、式(3)、式(6)から、下記式(14)を満足するような定数  $A$ 、 $B$  が対象とする流体の温度、圧力範囲内で求まるならば、この定数  $A$ 、 $B$  を流量計回路部内に組み込んでおくことにより、流体の温度、圧力の値を必要としないで、その補正が可能となる。

$$\sqrt{\frac{2d}{\tan \theta \cdot c^2}} = A(t - B) \quad \dots \dots \dots (14)$$

すなわち、この超音波流量計においては、測定可能な伝播時間  $t$ 、伝播時間差  $\Delta t$  のみを用いて次式によって流体流速が測定される。

$$V = \frac{1}{A^2(t - B)^2} \Delta t \quad \dots \dots \dots (15)$$

上記補正法の PWR 給水条件下での有効性を確認するため、高温高圧水中の音速の温度、圧力依存性を測定した。試験装置として、PWR 給水を模擬できる高温高圧タンクを作成した。タンク胴部は PWR 給水主配管と同寸法のパイプを用いており、超音波を送受するためガイド棒がその胴部に溶接されている。ガイド棒中の音速の温度依存性はあらかじめ測定してある。水中音速測定法は、超音波伝播時間から求める方法とし、ガイド棒の温度分布を測定し、ガイド棒中の伝播時間を求め、これを全伝播時間から差し引くことにより、設定温度、圧力下での水中伝播時間を求めた。

PWR プラントにおいては、図 2. に示すように原子炉出力が変化すれば、給水温度・圧力も変化する。したがって、高温高圧水中での音速測定は温度 100~220°C、圧力 50~75 kg/cm<sup>2</sup> の範囲で実施した。音速の温度依存性の一例を図 3. に、圧力依存性の一例を図 4. に示した。図 3. に示した音速の温度依存性は約 75°C に極大点をもつ曲線となり、大気圧下での傾向とよく似たものであった。音速の圧力依存性は図 4. からわかるように、音速の温度依存性に比べて、非常に小さいものであった。

各温度、圧力に対して測定された音速値から、この超音波流量計

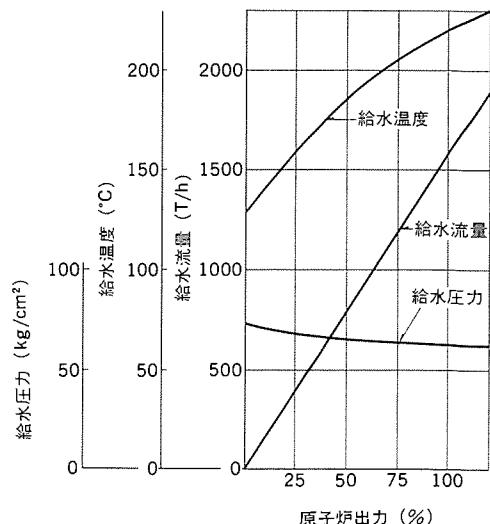


図 2. PWR 給水系統運転条件

出力の温度・圧力補正に係る式(14)の関係を図示したものが図5である。図は横軸にPWR出力に対応した給水温度、圧力下での超音波の送信から受信までの伝播時間を、縦軸には同じくその給水温度、圧力下での式(14)左辺をとったものである。図からわかるように両者は直線関係にあり、式(14)のA、Bは定数として求めることができる。このことから、この超音波流量計における出力の温度・圧力補正法はPWR給水条件下で有効に作用し得ることが明確とな

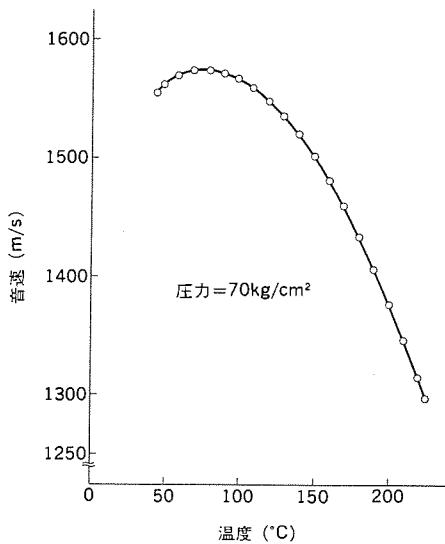


図3. 水中音速の温度依存性

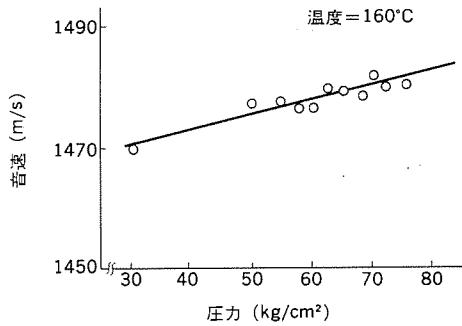


図4. 水中音速の圧力依存性

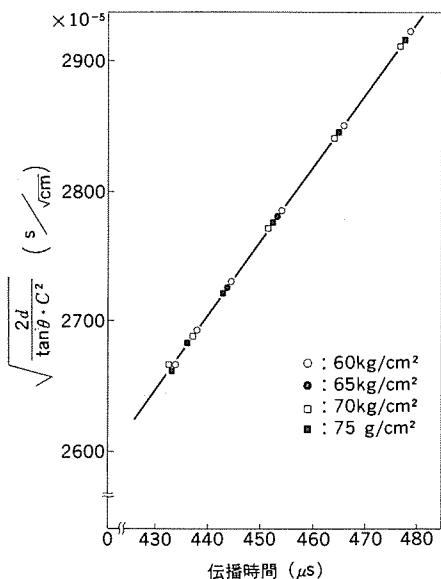


図5. 流体温度・圧力補正法の有効性

った。

#### 4. システム構成、機能

図6に示すように、この超音波流量計は、超音波送受信部、ガイド棒及び配管からなる流量計検出部と、各種測定回路からなる流量計回路部とから構成されている。

##### 4.1 流量計検出部

PWR給水系統の場合、主配管は内径368 mm、外径406.4 mmのSTPT配管であり、流体は最高220°C、70 kg/cm²の高温高圧水が2,000 T/hの流量で流れるものである。2対(4本)のガイド棒がこのようないくつかの配管に設置される。ガイド棒の配管外壁への取付方法は、超音波透過性の向上、雑音成分の低減、長期の安定した使用などを考慮して、溶接設置としている。ガイド棒側面は、超音波のガイド棒側面での反射の影響を防止する目的でラセン状溝が形成されている。

超音波送受信部として、上記ガイド棒それぞれの先端部に超音波送受信子が音響カップリング材を介して取り付けられている。超音波送受信子は通常のチタン酸ジルコン酸鉛( $PbTiO_3 \cdot PbZrO_3$ )圧電素子からなり。音響カップリング材としてシリコングリースが用いられている。

##### 4.2 流量計回路部

流量計回路部は図6に示すように前置増幅器、発振回路、タイミングコントロール回路、切換選択回路、受信回路、弁別回路、時間測定回路、増幅調整回路、演算回路から構成されている。

超音波送受信子は発振回路によって励振され、交互に送信、受信を行う。この切換はタイミングコントロール回路からの制御信号によって行われる。一方、超音波送受信子からの受信信号は前置増幅器にて増幅され、切換選択回路においてタイミングコントロール回路からのゲート信号によって選択され、該受信信号が受信回路に伝送される。受信回路を経た受信信号は弁別回路において、あらかじめ設定された

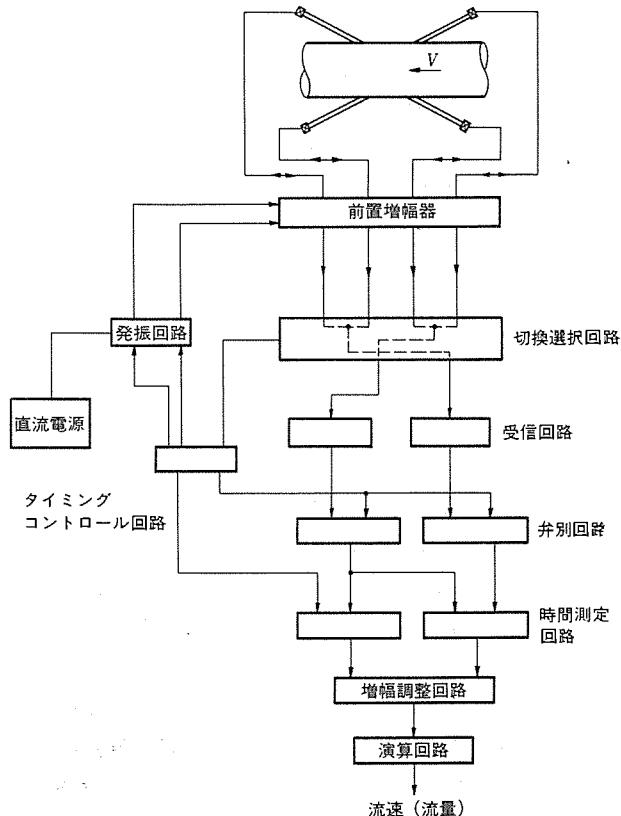


図6. 超音波流量計構成図

弁別レベルに従って弁別され、その弁別パルス信号を用いて時間測定回路において、上流方向、下流方向に対応した信号の送信から受信までの伝播時間及び両者の伝播時間差が測定される。こうして測定された伝播時間、伝播時間差は増幅調整回路において式(14)で示した温度・圧力補正係数で決まる補正がなされ、最終的に演算回路にて式(15)の演算処理が施され、流体流速値が输出されるというものである。

### 5. 実流較正試験

この超音波流量計における基本性能である、流量計出力の流速に対する直線性について、種々の  $L/D$  条件下での試験を図 7. に示す高精度実流較正試験装置を用いて実施した。なお、このときの流体は常温常圧水であった。また、 $L/D$  とは流量計設置位置の上流側配管曲がり部からの直管部長さを無次元化して表現したもので、配管曲がり部からの直管部長さを  $L$ 、配管内径を  $D$  とおいたものである。

試験結果の一例を図 8. に示す。測定は  $L/D = 3.5, 7.5, 15$ 、更に  $L/D = 15$  とし配管曲がり部直後に整流格子を設けることにより仮想無限長の 4 通りについて実施した。図中各  $L/D$  に対する直線は、流量計出力と基準流速とから最小二乗法により求めたものである。図からわかるようにすべての  $L/D$  に対して、この超音波流量計の出力直線性は  $\pm 0.5\%$  以内であり、この超音波流量計が配管曲

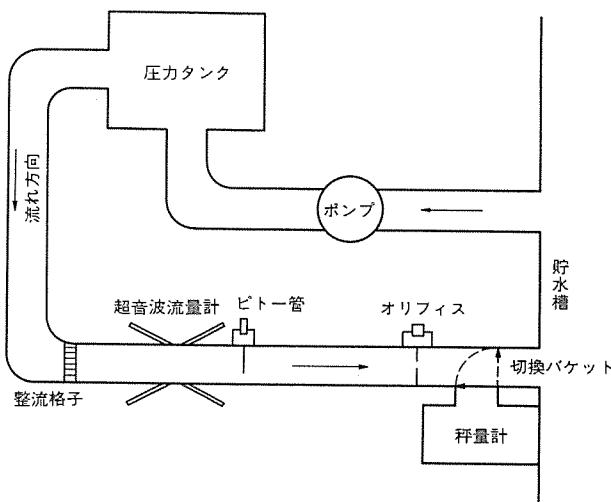


図 7. 実流較正試験装置

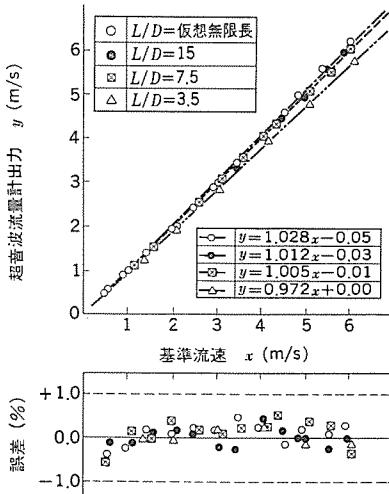


図 8. 超音波流量計出力直線性

がり部からの直管部長さが短い所に設置されたとしても、極めて良好な出力直線性をもつことが確認できた。

この超音波流量計出力は、超音波伝播経路に沿った線平均流速であり、図 8. における基準流速は図 7. の秤量計測による流量から求められる面平均流速である。超音波流量計においては、この線平均流速の面平均流速に対する比である流量補正係数を用いて流体流量を求める必要がある。この観点からは、図 8. は上記流量補正係数の  $L/D$  依存性を示すものである。

### 6. PWR プラント実証試験

この超音波流量計の出力直線性、安定性、更に流量計出力の温度・圧力補正法の有効性などの検証のためのプラント実証試験を実施した。試験は関西電力(株)高浜発電所 1 号機給水系統において実施した。

ガイド棒、超音波送受信部からなる流量計検出部は図 9. に示す位置に取り付けた。ガイド棒はプラント給水主配管に溶接設置した。取付位置の配管直管部長さは上流側配管絞り部から  $L/D = 36$ 、下流側配管曲がり部まで  $L/D = 11$  であった。流量計回路部本体は発電所中央制御室内に設置し、前置増幅器は流量計検出部から約 5 m の位置に設置した。

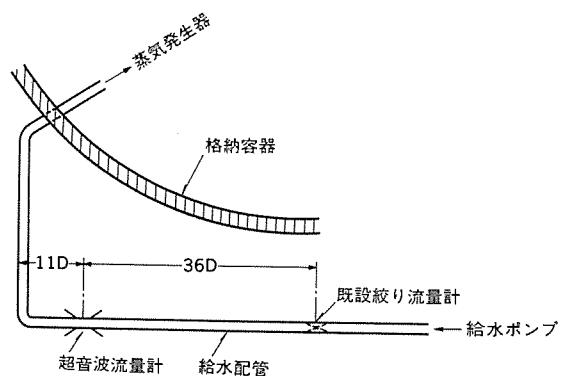


図 9. 流量計検出部のプラント取付位置

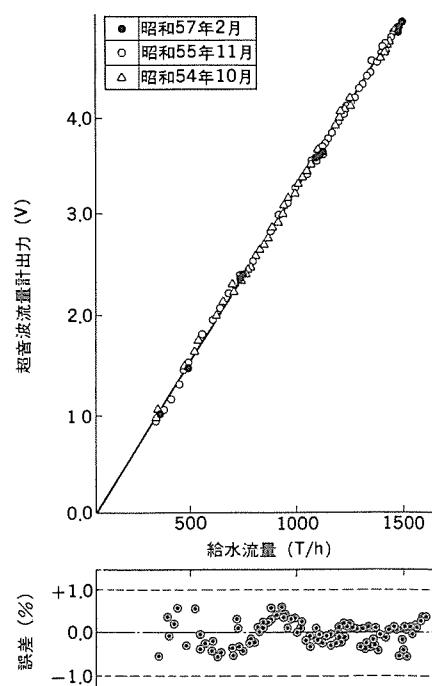


図 10. 超音波流量計出力直線性、再現性

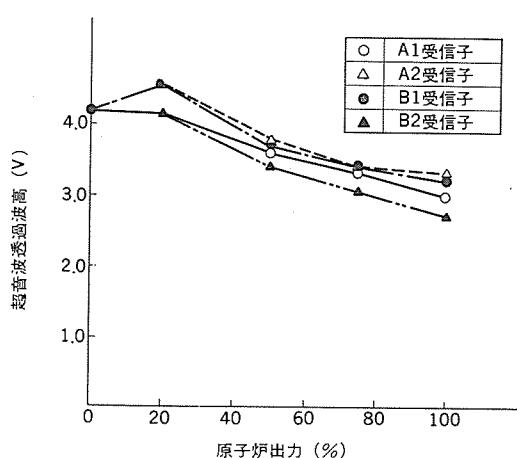


図 11. 原子炉起動時超音波透過波高変化

この超音波流量計出力の較正は、流量計設置後最初の原子炉起動時に既設流量計により実施した。以降約3年間の試験期間中、この超音波流量計の調整は一切実施せず、その出力を連続記録した。試験期間中、原子炉の起動、停止は各々3回であった。測定データから、流量計出力の直線性、安定性及び温度・圧力補正法の有効性、更には機器信頼性を評価、検討した。

図10. に原子炉起動時における給水流量に対する流量計出力の直線性と経時再現性の結果を示した。これらのデータは昭和54年10月、昭和55年11月、昭和57年2月の原子炉起動時において取得されたものであり、最小二乗法による直線からの偏差はすべて $\pm 0.6\%$ 以内であった。すなわち、この超音波流量計は原子炉起動時における図2. に示した給水温度、圧力変化のもとでも、出力直線性は $\pm 0.6\%$ 以内であり、また経時再現性を含めても $\pm 0.6\%$ 以内であった。また、以上のことから流体温度、圧力変化に伴う音速変化に対する出力補正法は実プラント運転条件下においても有効かつ適正なものであることを併せ検証できた。

原子炉起動時における超音波透過波高変化を図11. に示したが、透過波高変化は約 $-3\text{ dB}$ であり、流量計測上全く支障のないものであった。更に、原子炉定格運転時においては透過波高にほとんど変化はみられず、起動停止を含めて長期間連続して安定な流量計測が可能であることを確認できた。図12. には1サイクル原子炉定格運転時でのこの超音波流量計出力の連続記録を示した。図は参考のため、超音波流量計出力による給水流量値を用いて算出された蒸気

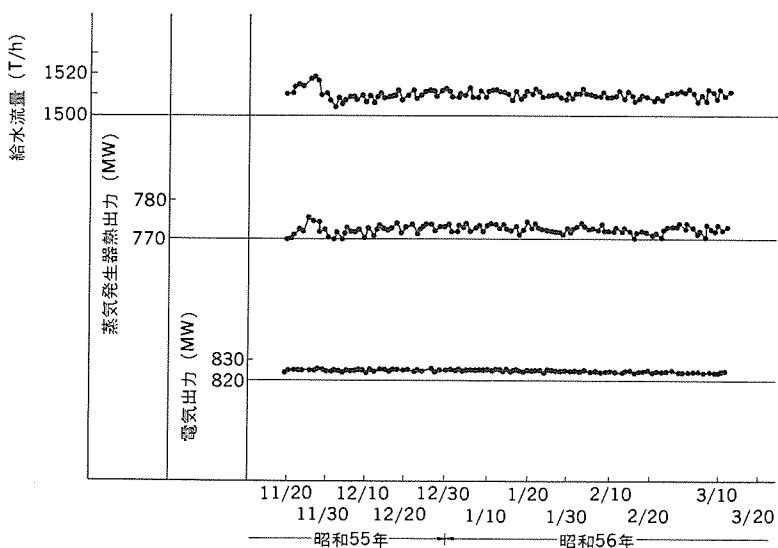


図 12. 超音波流量計出力安定性

発生器熱出力、及び発電所電気出力も併せ示した。図からわかるようにこの超音波流量計は極めて安定した給水流量を提供するものであった。なお、流量計設置時に調整した後は原子炉起動停止時を含めて試験実施全期間にわたって、この超音波流量計は無故障、無調整であり、プラント流量計としての機器信頼性も併せ確認できた。

## 7. む す び

PWR用としての高温高圧水流量計測のための超音波流量計を開発し、各種基礎試験、プラント実証試験を通じてこの超音波流量計がPWR用流量計とし極めて有効であることを実証したものである。

今後は、この超音波流量計の優れた特長を生かして、種々の高温流体の流量計測へと適用範囲が拡大してゆくことが期待される。

この開発を進めるにあたって御援助、御協力いただいた関西電力(株)及び三菱重工業(株)の関係各位に深甚の謝意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) O. UNO, H. ARAKI, S. HORIKOSHI, Y. OZAKI, M. ODA : Proceeding of the Specialist Meeting on Sodium Flow Measurement in Large LMFBR Pipes, P. 95 (1980)
- (2) 尾崎、荒木 : 計測技術, No. 10, Vol. 11 (昭58)
- (3) 池永ほか : 日本原子力学会秋の分科会, F 15 (昭58)
- (4) 同 上 : 同 上 , F 16 (昭58)

# 鉄鋼プロセスラインの全交流化駆動システム

片山誠一\*・新野修平\*\*・矢野禎成\*\*・手塚彰夫\*\*・瀬戸誠\*\*

## 1. まえがき

近年、自己消弧性と高速スイッチング機能を兼ね備えたパワートランジスタの大容量化に拍車がかかる、これに波形制御性の良いパルス幅変調(PWM)技術を適用することにより、中容量領域までトランジスタインバータを実用化することができるようになった。更に単一のコンバータから複数のPWMインバータに一括給電する直流配電システムを構成することにより、主回路の大幅な簡素化と良好な波形制御性を得ることができるようにになった。一方、マイクロプロセッサに代表されるデジタル化制御技術により、誘導電動機<sup>(1)</sup>の磁束分とトルク分電流を精度良く独立に制御する速応制御技術が確立してきた。

これらを背景として、誘導電動機の速応制御の実用化技術が確立し、プロセスライン駆動用モータに従来の直流電動機に代り、メンテナンスフリーの誘導電動機を適用できるようになった。

三菱電機(株)では、中小容量領域には、直流配電式トランジスタインバータを、これを越える容量領域には、個別給電式サイリスタインバータを適用したプロセスライン用交流化駆動システムを標準系列化しており、ここにその概要を紹介する。このシステムは、住友金属工業(株)鹿島製鉄所のEGLラインにおいて全交流化駆動システムとして実用化した。

## 2. 鉄鋼プロセスライン用インバータの標準系列

鉄鋼プロセスラインでは、ヘルパー用の数kVAからリール用の1,000kVAに至る容量のインバータが適用される。

図1.にこのインバータの標準系列を示す。中小容量領域では、パワートランジスタを適用した直流配電システムとし、単一のコンバータから複数のPWMインバータに一括給電している。大容量領域では、回生制御が容易な電流形サイリスタインバータを適用した個別給電システムとしている。各制御方式の仕様を表1.に示す。

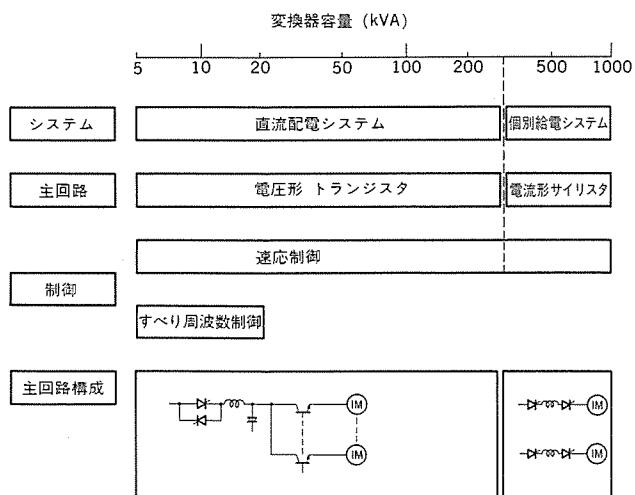


図1. インバータの標準系列

表1. プロセスライン用インバータ仕様一覧

項目	滑り周波数制御方式トランジスタインバータ(電圧形)	速応制御方式トランジスタインバータ(電圧形)	速応制御方式サイリスタインバータ(電流形)
回路構成	図2.参照	図3.参照	図4.参照
速度制御範囲	1:20	1:50 (ストールトルクも可能)	1:50 (ストールトルクも可能)
速度精度(%)	±0.5	±0.2	±0.2
速度応答(rad/s)	10	30	30
定出力範囲	1:1.5	1:3	1:3
速度センサ	PLGなど	PLGなど	PLGなど
適用	ヘルパーなど 小容量機	プライドルなど 中・小容量機	テンションリール テンションレベラなど 大容量機

## 2.1 直流配電システム(電圧形)

パワートランジスタの高速スイッチング特性を活用し正弦波PWM制御を適用した直流配電システムは、単一の直流母線から複数のPWMインバータに給電し、個々の誘導電動機の速度を独立に制御できるライン駆動に最適なシステムである。

このシステムは以下に述べる数々の特長をもっている。

### (1) 省スペース

コンバータの共通化により、小容量の装置では1面に複数台(最大6台)収納可能である。

### (2) 高力率

直流母線の電圧はコンバータにより常に定電圧化されているため、電源力率は電動機の速度によらず、高力率を保つことができる。

### (3) 高信頼性

従来のサイリスタ方式に比べて転流回路が不要なため、主回路部品点数が大幅に少くなり、信頼性がより一層向上した。

### (4) 安定性

インバータの出力電圧を全速度領域にてPWM制御するため、低速域から高速域まで安定した加減速運転が可能である。

制御方式については、簡単な滑り周波数制御方式と、直流機並みの速応性をもつ速応制御方式がある。

### 2.1.1 滑り周波数制御方式トランジスタインバータ

図2.に滑り周波数制御方式トランジスタインバータの構成を示す。この制御方式は、速度閉ループをもつ速度制御方式で、主にプロセスラインのヘルパーロール駆動用に適用する。

速度制御器SCの出力を滑り周波数 $\omega_s$ とし、これと速度帰還信号 $\omega_m$ とを加算し一次周波数基準 $\omega_e$ とする。一次周波数基準信号は、最低周波数を規制する周波数パターン回路(F-PAT)を経由してインバータ周波数 $F$ を指令する。また、電圧パターン回路(V-PAT)を経由してインバータ出力電圧 $V$ を指令する。 $F$ 及び $V$ はPWM回路に導かれ、パルス幅変調された出力信号をベースドライブ回路(B

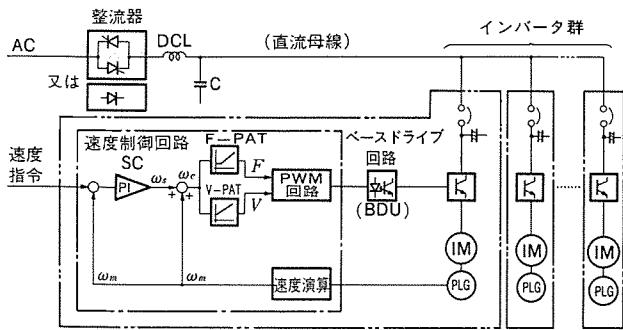
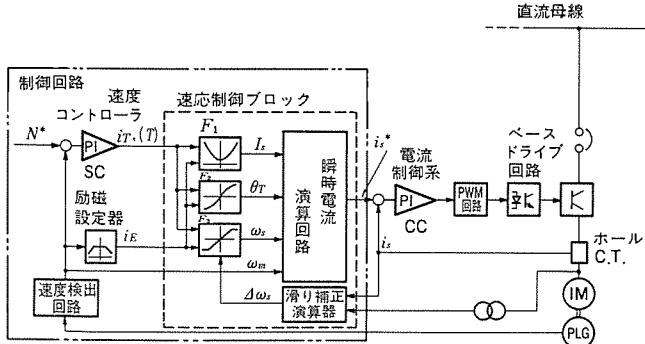


図 2. 滑り周波数制御方式トランジスタインバータ構成図  
(直流配電システム)



(a) 構成図 (直流配電システム)

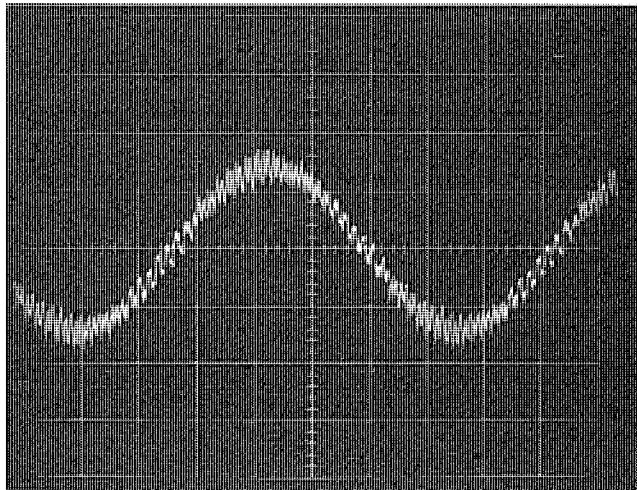


図 3. 応応制御方式トランジスタインバータ

DU) に供給し、所望の電圧及び周波数を得る。

この方式は、速度制御系をもつため、せん(揃)速性の良い制御が可能である。

### 2. 1. 2 応応制御方式トランジスタインバータ

図 3. (a) に応応制御方式トランジスタインバータの構成を示す。この方式は電流制御系 CC をもっており、トルク指令に応じたトルクの制御が可能であり、応応性を必要とする場合や精密なトルクの制御が要求される用途に適用する。

後述の応応制御理論に基づき、トルク指令  $T$  に応じた一次電流指令  $i_s^*$  を演算し、実モータ電流  $i_s$  との偏差を PWM 回路により増幅し電流閉ループ制御しており、電流波形は図 3. (b) に示される正弦波状となる。特長として次のことがあげられる。

#### (1) 高速応答

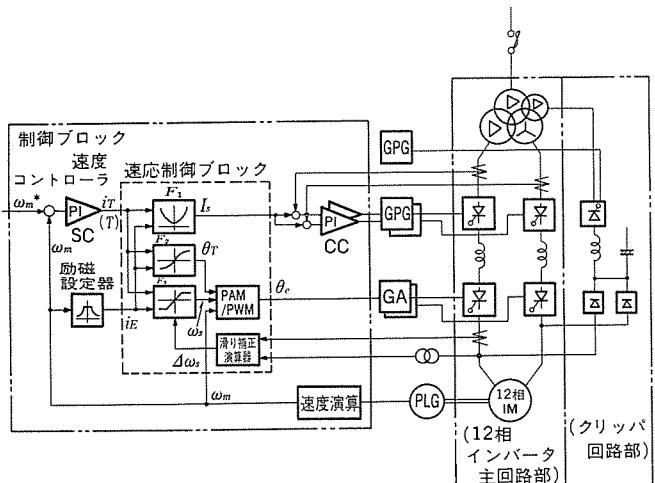
直流機並みの速度応答 (30 rad/s) が可能である。

#### (2) ストールトルク

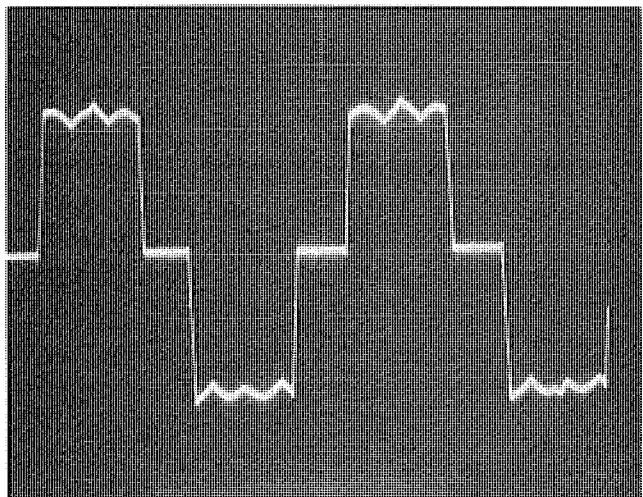
トルク制御はもちろんのこと、ストールトルク制御も可能であり、テンショニリールなどのトルク精度が必要なものへの適用が可能である。

#### (3) 定出力制御

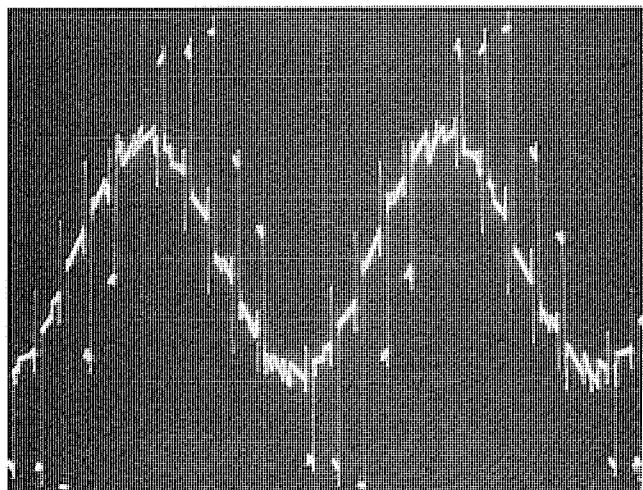
界磁制御が可能なため、インバータ及び電動機の容量を低減すること



(a) 構成図



(b) 出力電流波形 (40 Hz, 430 A)



(c) 出力電圧波形 (40 Hz, 430 V)

図 4. 応応制御方式電流形インバータ

ができる。

## 2.2 個別給電システム（電流形）

大容量領域には、容量及びシステム構成上、個別給電システムとしている。このシステムには回生制動が容易で、電流制御に適した電流形サイリスタインバータを適用する。

図4.(a)に速応制御方式電流形インバータの構成を示す。速応制御方式トランジスタインバータと同様、後述の速応制御理論に基づきトルク指令 $T$ に応じた電流の絶対値指令 $I_S$ 及び位相指令 $\theta_e$ を演算し、コンバータ側で電流の絶対値 $I_S$ を制御し、インバータ側で位相 $\theta_e$ を制御する。出力電流波形を図4.(b)に示す。

速応制御の適用により、高速応答、ストールトルク、定出力制御が可能であり、電流形インバータとして次の特長をもっている。

### (1) 多相モータの採用

誘導電動機の相数を標準の6相から12相へと多相化し、12相インバータ駆動とすることにより、トルクリップルを低減した。

### (2) PAM/PWMの併用

高速時はPAM、低速時はPWMとし、低速時の速度の凹滑性を確保した。

### (3) クリッパ回路の採用

転流エネルギー回生用クリッパ回路を採用するとともに、インバータ素子に高速大容量サイリスタを適用し、高速転流を実現し、ストール時、及び界磁弱め領域においても、装置過負荷容量まで安定した運転を得ることができる。同時に転流サージ電圧を制限し、電動機の絶縁設計が容易である。出力電圧波形を図4.(c)に示す。

## 3. 誘導電動機の速応制御

誘導電動機は直流電動機と同様に、励磁電流成分とそれに直交するトルク電流成分に分離して制御することにより速応制御することができる。トルク分電流指令 $i_T$ と励磁分電流指令 $i_E$ に基づき、電動機に給電する電流の大きさ $I_S$ 及び電流位相 $\theta$ を演算し、これにより電動機電流を制御する。

この方式の詳細は文献(1)に説明されており、電動機に給電すべき電流 $i_S$ はその1相分について次式にて与えられる。

$$i_S(t) = I_S \cdot \sin \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$I_S = \sqrt{i_E^2 + i_T^2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\theta = (\omega_m + \omega_s) t + \theta_T \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\theta_T = \tan^{-1} \frac{i_T}{i_E} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$\omega_s = \frac{r_r'}{L_r'} \cdot \frac{i_T}{i_E} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

$\omega_m$ ：回転周波数

$\omega_s$ ：すべり周波数

$\theta_T$ ：トルク角

$r_r'$ ：回転子抵抗

$L_r'$ ：回転子自己インダクタンス

式(1)で表される電流を電動機に給電することにより、トルク $T_e$ は式(6)で表され、速応制御される。

$$T_e = \frac{n P_0}{4} \cdot \frac{L_m^2}{L_r'} \cdot i_E \cdot i_T \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $n$ ：相数

$L_m$ ：相互インダクタンス

$P_0$ ：極数

## 3.1 制御ブロック

速応制御をインバータに適用した図3.(a)あるいは図4.(a)中、関数演算器 $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ は式(2), 式(4), 式(5)を演算する。滑り補正演算器は後述するように電動機定数の変化に応じて滑り周波数 $\omega_s$ を補正するもので、トルク線形性が必要な場合に適用する。

トランジスタインバータにおいては、瞬時電流演算回路にて式(1)で示される正弦波電流指令 $i_S$ を求める。電動機電流は、この電流指令に基づいて瞬時制御される。サイリスタインバータにおいては、函数 $F_1$ により演算された給電電流の大きさ $I_S$ はコンバータの電流指令となり、函数 $F_2$ 及び $F_3$ で演算された電流位相 $\theta_e$ はインバータの位相指令となる。

## 3.2 滑り補正

式(1)～式(5)に示すように電動機に給電する電流指令には回転子抵抗 $r_r'$ 、インダクタンス $L_r'$ を含んでおり、これらの定数は運転条件により変化する。したがって特にトルク制御精度が必要な場合は、図3.(a), 図4.(a)に示される滑り周波数補正回路を適用する。この回路には次に述べる二つのモデルがあり、全周波数・全負荷領域にわたってトルク制御精度を良好に保つことができる。

### (1) 電圧モデル

式(2), 式(4), 式(5)から滑り角周波数指令 $\omega_s$ 、電流絶対値指令 $I_S$ が一定の条件で回転子抵抗 $r_r'$ が増加すれば励磁電流成分 $i_E$ も増加する。したがって電動機磁束が増加し、電動機電圧が増加する。電圧モデルではこの変化を利用して滑り周波数補正指令 $\Delta\omega_s$ を出力し、滑り周波数を変化させてトルクの変動を抑えている。なお、低周波領域ではサーマルモデルに切り換えている。

### (2) サーマルモデル

回転子抵抗 $r_r'$ は発熱量の一次遅れで変化することから、電動機の熱時定数、熱利得を知れば、上記補正信号 $\Delta\omega_s$ を演算することが可能であり、これにより低速時のトルク変動を抑えることができる。

## 4. デジタル制御方式

以上の各種インバータでは、デジタル制御方式を採用しており、従来のアナログ方式と比較し、次のような特長をもつため装置の高性能化、高機能化を図ることができる。

(1) アナログ回路特有のドリフトが生じないため経時変化が生じず、ドリフト調整が不要。

(2) 高精度な制御が可能である。

(3) 制御系の定数がデジタルにて設定できるため、ゲイン設定が確実になり、演算精度が向上する。

更にマイクロプロセッサを使用したデジタル制御では、その高機能性を利用して、以下の機能を追加することができる。

(4) 自己診断が可能であり、故障時の復旧時間が短い。

(5) トレースメモリにより事故時の各部波形が再現でき、故障の解析がより確実にできる。

(6) 《MELPLAC》などの上位計算機と高速シリアル伝送が可能である。

### 4.1 ハードウェア構成

デジタル制御装置のハードウェア構成を図5.のブロック図に示す。CPU部は16ビットマイクロプロセッサ8086を使用し、速度制御・速応制御・電流制御・周波数制御を行い、更にシーケンス制御、故障診断などを行っている。デジタルI/O部はホトカプラーによる光絶縁で耐ノイズ性を

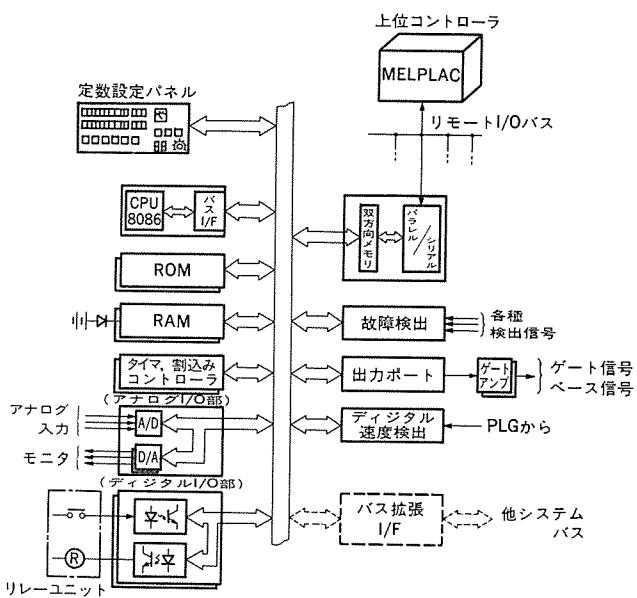


図 5. デジタル制御ブロック図

向上させて、リレー、あるいはゲート信号とのインターフェースを行っている。アナログI/O部は12ビットの高速変換器を使用し、指令やフィードバックの取込みと各種制御量のモニタ回路への出力を行っている。

速度検出部は複数個のPLGパルスの間隔を、高速クロックパルスで計測して速度を演算している。これにより、ストール時から定格速度まで高精度高速度に速度検出が可能となり、速度制御系の高速化を実現している。

#### 4.2 ソフトウェア構成

デジタル制御ではサンプリング制御による直列時分割処理であり、速度制御系、電流制御系などの安定性を考慮する必要がある。今回の制御方式では、アルゴリズムは従来のPID制御方式を差分形式で置き換え、またサンプリング時間はできるだけ短縮し制御系の安定性を確保している。

### 5. 試験結果

前述の速応制御理論に基づき、社内試験設備でVVVF装置と誘導電動機の組合せ試験を行い特性を確認したので、以下代表的なものについて説明する。

#### (1) 加減速特性

図6.に速応制御方式トランジスタインバータによる加減速特性を示す。零速度から定格速度まで、滑らかに運転していることがわかる。なお、速度精度、速度応答、及び安定性とも従来の直流機システムと同等であることを確認した。

#### (2) トルクリニアリティ

図7.に速応制御方式サイリスタインバータによるトルク特性を示す。図から、トルク指令に対する実測トルクのリニアリティは良好である。なお、ストール時のトルクリニアリティも良好であり、また電動機連続運転時にも滑り周波数補正回路の働きにより、トルク変動は生じないことを確認した。

#### (3) トルクリップル

速応制御方式トランジスタインバータは高周波で正弦波変調されており、

本質的に電動機の電磁トルクリップルは極めて小さい。一方、速応制御方式サイリスタインバータ及び電動機は、トルクリップル低減のため多相化している。理論的には、トルクリップルの主な周波数成分は第11次と第13次高調波電流による電源周波数の12倍で脈動する成分となり、またその大きさは定格トルクの5%程度である。更に、PWM領域では変調周波数による脈動トルクが含まれる。そこで図8.で示される機械系でトルクリップルを測定した。

(a) 機械系の特性：電磁トルクリップルを測定するには、トルクメータで求めた値を機械系のトルク応答特性で補正することが必要である。そこで、機械系にトルクショックを与えて共振周波数及び共振倍率を求めたが、それぞれ44Hz、27倍であった。機械系はすべてバックラッシュのない理想的なカップリングで結合されているものと仮定し、シミュレーションにより、電動機を定格トルクで加振したときのトルク応答特性を求めた。結果を図9.中の実線で示し、また定格トルクの5%で加振したときのそれを破線で示す。

(b) トルクリップル：直流機で定格負荷をとった状態で、トルクリップルの周波数分析を行った。特に電源周波数の12倍の成分に着目

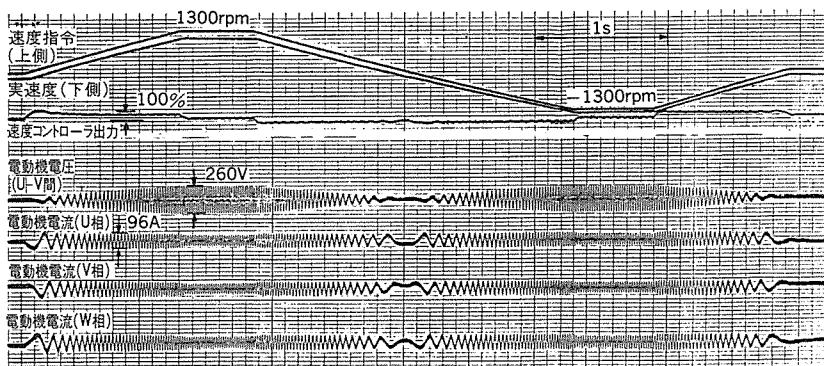


図 6. 加減速時のオシログラム (誘導電動機 44 kW, 1,300 rpm 定格)

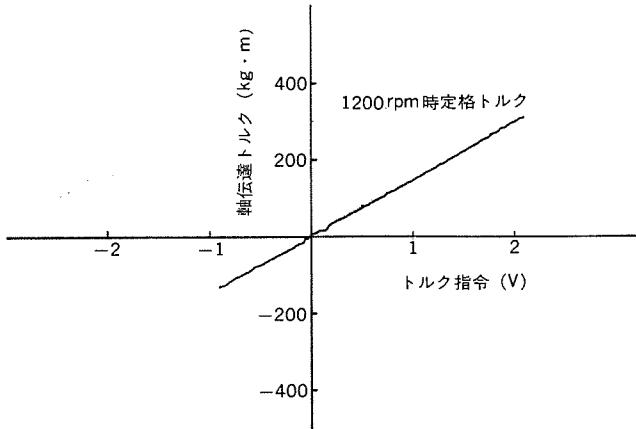


図 7. 速応制御電流形インバータトルクリニアリティ (誘導電動機定格 375 kW, 460 rpm)

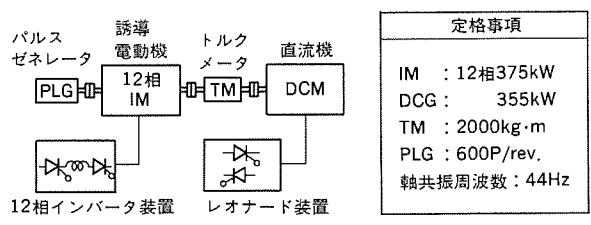


図 8. 機械系構成図

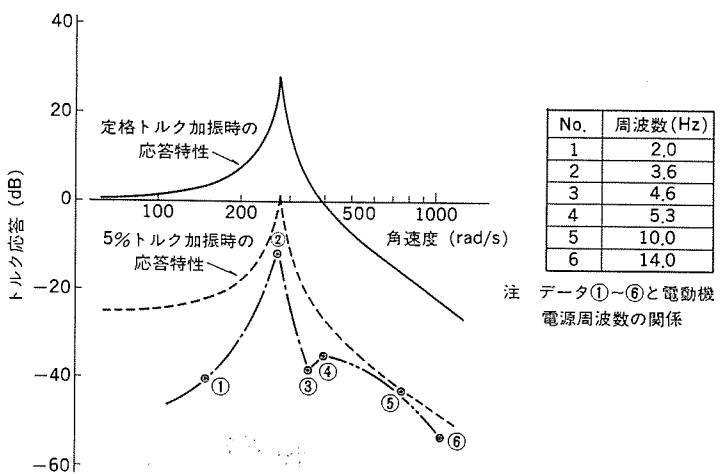


図 9. 脈動トルク測定結果 (12次成分)

し、その分析値を図 9. に示すが、これらはすべて 5 % トルクで加振したときのレベルを下回っており、PAM 領域では 2 ~ 5 %、PWM 領域では 1 % 以下であることがわかる。また、他の周波数成分についてはすべて 1 % 以下であった。

なお、PWM 領域では変調周波数成分のトルクリップルが約 7 % 発生しているが、90 Hz と高いため、実際の機械系では十分減衰することが予想される。

## 6. 適用例

### 6.1 インバータの適用

図 10. にプロセスラインのシステムスケルトン及びライン図を示す。まず小

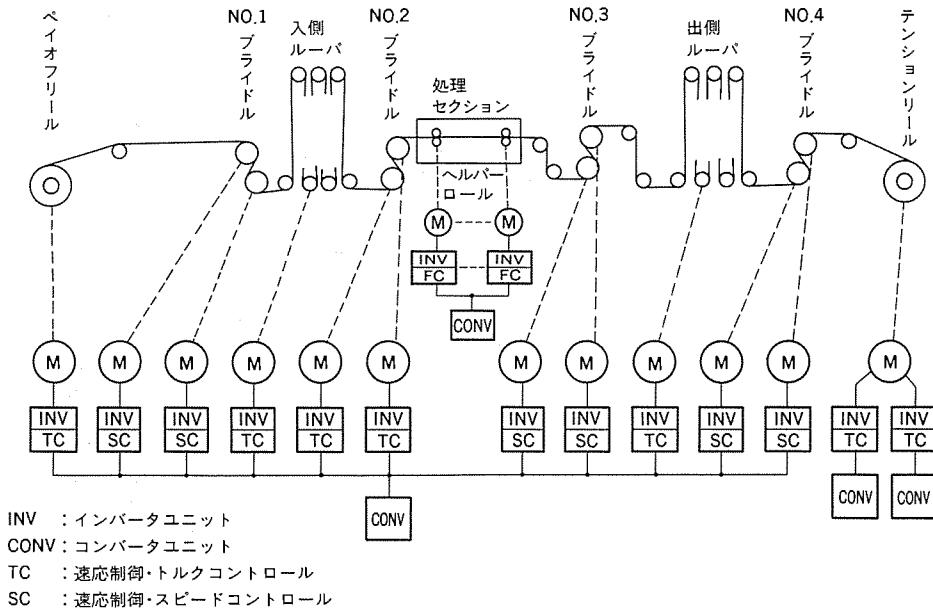


図 10. プロセスラインのシステムスケルトン/ライン図

容量ではあるが台数の最も多いヘルパーロールでは、特に高速応答は必要としないため、滑り周波数制御 PWM トランジスタインバータを適用する。これは従来の直流機システムでも 1 台ごとの速度制御性能は

一貫特性によっているため、応答性をあまり必要としないからである。次に ブライドル、リール、及び ルーパ では、従来の直流機システムと同等の応答が必要なため、速応制御方式トランジスタインバータを採用する。リールあるいはレバについて、大容量機であるため速応制御方式、電流形インバータを採用する。

なお、ヘルパーロールでも連続焼純ラインのように炉内張力制御を行い、またライン運転開始時にストールトルクが必要な場合には速応制御、トランジスタインバータを採用している。

### 6.2 適用上の問題点

#### (1) 定出力範囲の限定化

従来の直流電動機は定出力範囲が標準的に 1 : 2 であった。交流電動機の場合は定出力範囲を見直し 1 : 1.5 と縮小し、枠番の増大を抑えた。

#### (2) トルクリップルと機械共振対策

インバータは特に低速域でのトルクリップルが機械系の共振周波数と一致する場合があり、注意が必要である。今回実機械系強度計算とシミュレーションにより、インバータの発生する電磁トルクリップルでは実用上問題無いことを確認している。

#### (3) 低速連続運転状況での誘導電動機の温度上昇対策

低速度での連続運転を行う場合には、電動機の冷却効果が低下するため注意が必要である。ヘルパーロールは耐環境性のため全閉形としてある。一方、ブライドル、リール及び ルーパ 用については全閉形あるいは開放形の強制通風冷却形を採用して、電動機の枠番増大を抑えた。

## 7. むすび

プロセスライン用交流化駆動システムにおける標準系列の概要について述べ、直流機並みの動特性と定常特性をもつメンテナンスフリーの交流可変速システムが構成できることを述べた。プロセスラインのほかに、各分野で直流可変速システムに代る保守性の良い交流可変速システムが囁きされており、その需要はますます拡大することが予想される。今後半導体素子の高速・大容量化とデジタル制御技術の高速・高集積化が一層促進されるとともに、より高密度で高性能化された交流可変速システムが構成しうる見通しであり、ユーザー各位の御期待に沿いたいと念願する次第である。

## 参考文献

- (1) 赤松ほか：VVVF インバータによる誘導電動機の速応制御、三菱電機技術、56、No. 6 (昭57)

# 全自动高速丸鋸鋼管切断機

星野吉信\*・生原春夫\*\*・村松英樹\*\*\*・戒田英昭\*\*\*・坂本正行\*

## 1. まえがき

従来、石油開発用のシームレス鋼管などの鋼管製造ラインにおける鋼管の切断は、主としてフリクションソーによって行われているが、切断面の状態が思わしくなく、また切断時の騒音が大きいなどの問題があった。一方、これらシームレス鋼管の需要増加に伴い切断面の再加工を必要としない、また騒音の小さい鋼管の大量自動切断システムの開発が望まれていた。

三菱電機(株)では、かねてから検討を進めていたが、住友商事(株)が西独 TREMAG 社から鋼管切断機の技術導入を行ったのを機に、住友商事(株)の協力を得て、既にオーストリア VÖEST 社で鋼管製造ライン用として稼働実績のある西独 TREMAG 社の VRU-16 形切断機製作のライセンス権を得て、日本の製鉄会社の要求仕様にマッチすべく、この改良形を開発し、住友金属(株)海南钢管製造所へ納入した。

本機の特長は、従来鋼管の切断に対して適用不可能と考えられていた超硬チップソー(以下、HM のこぎり(鋸)刃と称す)の適用を可能とともに高速度工具鋼セグメンタルソー(以下、HSS 鋸刃と称す)と併用できるようにしたこと、更に製造ライン用自動制御機械として上位計算機と結合し搬送ラインとの連動運転を可能としたことがある。本稿では、この全自动高速丸鋸鋼管切断機の概要と切断試験結果について紹介する。

## 2. 鋼管切断機の概要

この丸鋸鋼管切断機は、鋼管製造ラインにおいて鋼管の高速冷間切断を目的として開発された専用機である。本機は、前述の西独 TREMAG 社の VRU-16 形丸鋸鋼管切断機を基本とし、これに客先要求の諸事項を取り込み、高信頼度に設計されている。

丸鋸鋼管切断機に要求される性能は、鋸刃性能が十分発揮できること、また切断面は過熱やかえりがなく追加加工なしに製品として販売あるいは次工程の作業に進むことができるこことであり、十分な機械強度をもつて切断機本体と最適切断条件での鋸刃送り制御が要求される。更に、鋼管製造ラインにおいて運転される場合、鋼管の定寸・クランプ・切断・アンクランプの動作をすべて自動で行える必要があり、自動制御機械としての機能も要求されてくる。以下に本機の主要機能、切断機の構造・機能、制御システムについて述べる。

### 2.1 主要機能

全自动高速丸鋸鋼管切断機の主要機能は表 1 のとおりである。

### 2.2 切断機の構造・機能

図 1 に丸鋸鋼管切断機の外観を示す。切断機本体の主要構造は次のとおりである。

- (a) 減速機、鋼管クランプ装置、鋸刃送り機構など主要装置を強固に取り付けるため厚鋼板の主フレームを骨格としている。
- (b) 各装置の配列は、主フレームに対し、減速機は中央部に内蔵、鋼管クランプ装置は上部取付け、鋸刃送り機構は減速機の一端をフ

表 1. 切断機の主要機能

寸 法 (mm), 重 量 (t)	1,900(L) × 4,200(W) × 3,865(H), 34
切 断 方 式	アップカット式(鋸刃は上方向へ移動)
切 削 速 度 (m/min)	16~160, 12 段变速
鋸 刃 送 り 速 度 (mm/min)	80~1,500, 無段階制御
鋸 刃 早 戻 り 速 度 (m/min)	35
鋸 刃 送 り ス ト ロ ー ク (mm)	320
鋸 刃 取 付 構 造	フランジによるボルト締結方式
鋸 刃 先 の 種 類	超硬チップ(HM), 高速度工具鋼(HSS)
鋸 刃 の 直 � 径 (mm)	1,600(HM), 1,610(HSS)
特殊工具使用での鋸刃取換時間 (min)	6~10(最短 3)
鋸 刃 の 冷 却 シ ス テ ム	切削液吹き付け式
鋼 管 ク ラ ン プ 方 式	鋸刃両側にて水平垂直同時クランプ
最 大 ク ラ ン プ 力 (t)	垂直方向 max 16, 水平方向 max 6
ク ラ ン プ 開 口 尺 度 (mm)	クランプ最大開口幅 1,050 クランプ最小開口幅 15 クランプ最高開口高さ 210 有効クランプ幅 約 950

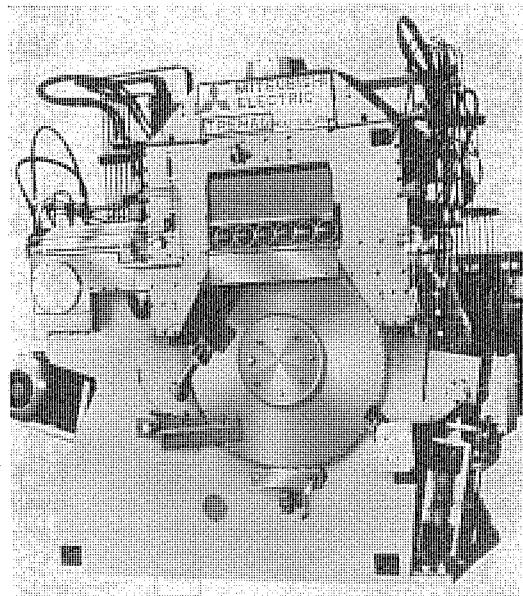


図 1. 鋼管丸鋸切断機

レーム機壁に軸受支持、他端を油圧シリンダにより軸受支持する構造とした。これによりアップカット方式の切断が行える。

次に切断機の搬送ライン内の配置について述べる。VRU-16 形丸鋸鋼管切断機は、鋼管の搬送は直進送りとして設計されており、丸鋸刃取付け側が鋼管の進入方向となっている。したがって搬送ライン内の配置は通常図 2 のようになる。また図の切断機では、鋼管の中間切断のほかにクロップ切断を行うため、本機の前後に内側テーブル、出側テーブルを取り付けている。これにより切断後テーブル傾転

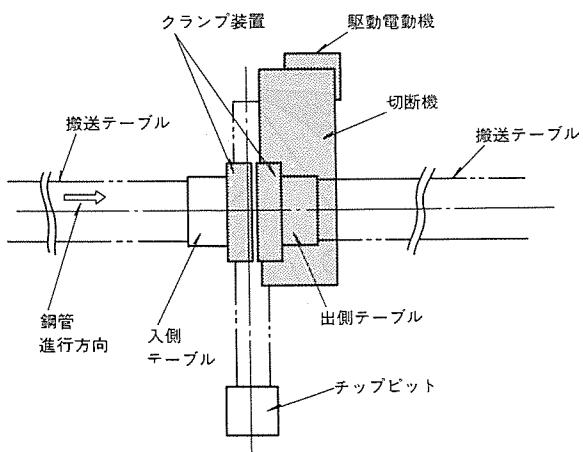


図 2. 切断機配置

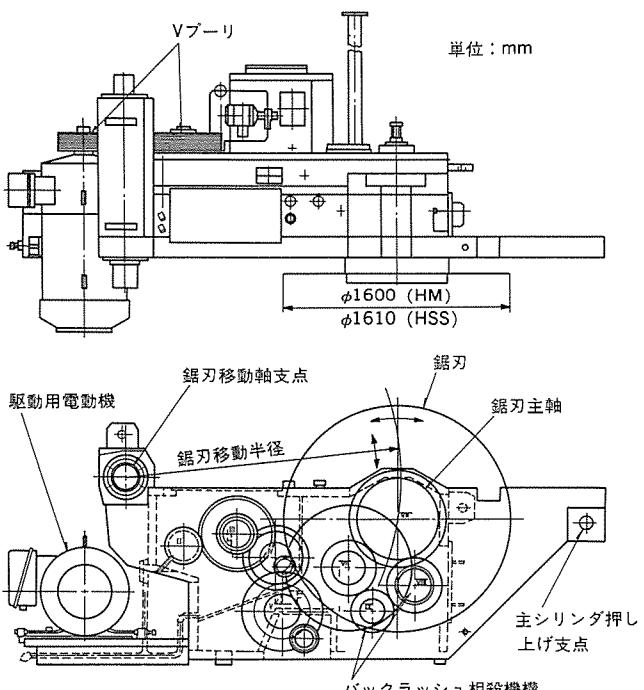


図 3. 減速機構造図

動作することによりクロップ処理が行える。以下に主要装置の基本構造と機能について述べる。

#### (1) 減速機

減速機の構造を図 3. に示す。減速機は駆動電動機の動力を鋸刃に伝達するとともに鋸刃を強固に保持するものであり、鋸刃架台の役目を果たすものである。歯車列は平歯車の多段減速となっており、鋸刃が取り付けられる最終段の主軸にはバックラッシュ相殺機構が設けられている。また、この主軸の軸受には静圧軸受を使用しており鋸刃軸系の振動を抑制している。切削速度の切換は誘導電動機の極数変換と減速機の速度比切換の組合せにより、16~160 m/min, 12 段変速が行える。

#### (2) 鋼管 クランプ 装置

フレーム上部に取り付けられている鋼管 クランプ 装置を図 4. に示す。この装置は鋸刃をはさんで上流側、下流側に二組設けられており、2 個の水平 クランプ と 1 個の垂直 クランプ から構成されている。これらの クランプ は油圧 シリンダ により駆動され、押し付け力は鋼管の寸

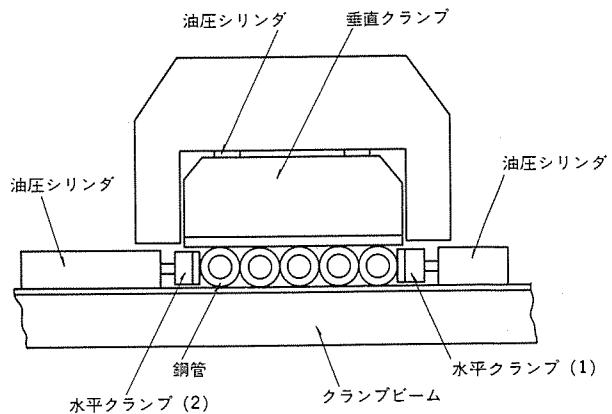


図 4. 鋼管 クランプ 装置

法、強度により自動的に油圧を設定することにより制御される。開口部の寸法は表 1. に示すとおりであり、有効 クランプ 幅以内の鋼管幅で鋼管は搬送される。搬送された鋼管の クランプ は次の要領で行われる。図 4. において、

- 水平 クランプ (1) が、まず前進する。
- 次いで垂直 クランプ が低圧で下降し、鋼管を抑えつける。
- クランプ 圧力が高圧に切り換わり、垂直 クランプ が ロックシリンダ により固定される。
- 水平 クランプ (2) が所定圧力で前進し、鋼管を クランプ する。

以上の動作は鋼管の永久変形が生じない範囲で全自動で行われる。

#### (3) 鋸刃送り機構

鋸刃の送りは鋸刃架台の正面右下部に取り付けられた主油圧 シリンダ 及び中央下部に取り付けられた補助の油圧 シリンダ により行われる。切断時の下方から上下への送りは、主油圧 シリンダ の押し上げと補助 シリンダ の押し下げにより行われ、送り機構の クリアランス を相殺して振動に対する抑制効果を持たせる機構となっている。

切断時の送り量の制御は、主油圧 シリンダ を油圧 サーボ弁で制御することにより行われ、送りに必要な力は主油圧 シリンダ により与えられる。鋸刃の戻り動作は主油圧 シリンダ 内の油をバイパスし、補助 シリンダ の力により行われる。補助 シリンダ には、常に戻り方向の力が作用しておりタイミングのよい戻り動作が行われる。

#### (4) 振動抑制機構

鋸刃による鋼管切断の成否は、切断時鋸刃から発生する振動を如何に抑制するかにより大きく左右される。本機では主に次のような対策を行って高効率の切断が可能となっている。

- 装置全体の剛性を高めるためフレーム、減速機箱体は厚鋼板溶接構造とした。
- 鋸刃主軸には高剛性とダンピング効果を持たせるため、静圧軸受を採用するとともに主軸歯車にはバックラッシュ相殺機構を付加させた。
- 鋸刃架台の送り機構には主油圧 シリンダ、補助 シリンダ を用いて予圧力を作用させながら送る機構を採用し、鋸刃架台の振動を抑制している。
- 鋸刃取付けの フランジ 寸法を極力大きくとり、鋸刃胴板寸法を小さくして鋸刃自身の剛性を上げ振動を抑制している。

#### 2.3 切断機制御システム

三菱電機(株)の切断機制御 システム の要点は次のとおりである。

- プラントコントローラ として豊富な実績をもつ《MELPLAC》を導入した。

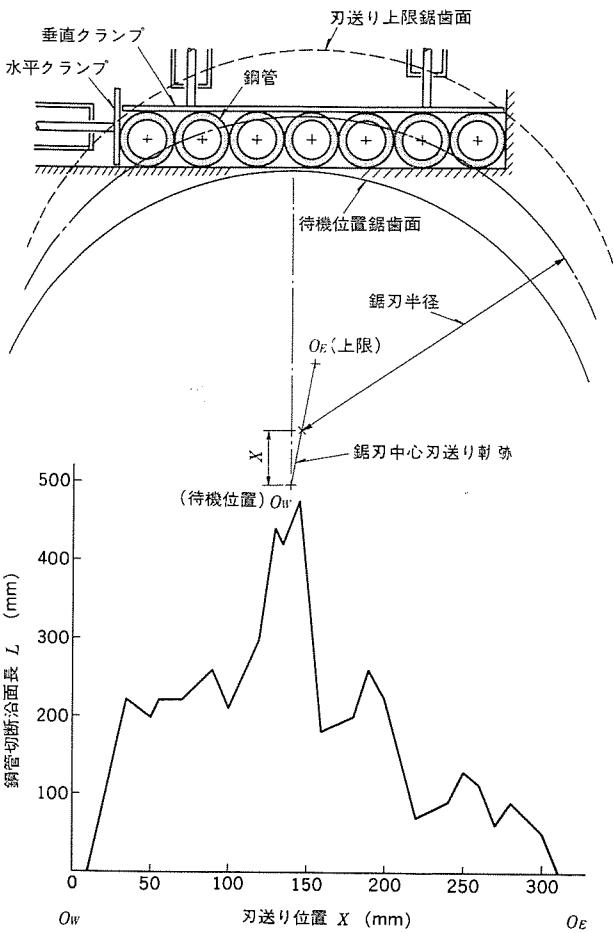


図 5. 刃送り軌跡と鋼管切断沿面長さの関係

- (b) 鋼管搬送システムと連動した完全自動化を可能とした。
- (c) 上位計算機とのデータリンクによる鋼管仕様(外形、肉厚、本数、管種)の設定を可能とした。
- (d) 鋼管仕様を入力すれば内部演算により、最適なクランプ圧力、鋸刃周速、刃送り速度が得られる制御を可能とした。
- (e) 自己診断機能として、理論切削パワーと実切削との比較による異常検出、鋸刃の選択が不適当な場合のアラーム機能などを備えた。

次に、この制御システムの基幹である刃送り制御について述べる。

#### (1) 鋼管切断沿面長さの演算制御

図5.は、この切断機の刃送り軌跡と鋼管切断沿面長さの変化を示したものである。鋼管切断沿面長さの演算は、鋼管仕様の設定変更後の切断開始に先立ち行われ、一定刃送り位置ごとに各鋼管切断沿面長さを全本数分積算した値  $L$  が求められ、データメモリに各刃送り位置ごとに記憶される。

#### (2) 一歯切込み量の演算制御

最適切断を行うには、鋸刃の一歯のふところ面積に入る切粉量を、常にある割合以下に保つことが必要である。その割合を越えると切粉が歯面に焼け付き、歯を破損するなど不具合が生じる。図6.は、HSS鋸刃における1セグメント分の拡大面である。

今、最適一歯切粉量  $Q$  は、次式で求められる。

$$Q \leq k_1 \cdot P \text{ mm}^2$$

ここで、 $P$  は一歯ふところ面積、 $k_1$  は切粉占積率である。

一方、一歯切粉量  $Q$  は、前項で求められた切断沿面長  $L$  と一歯当たりの切込み量  $U$  との積で与えられる。

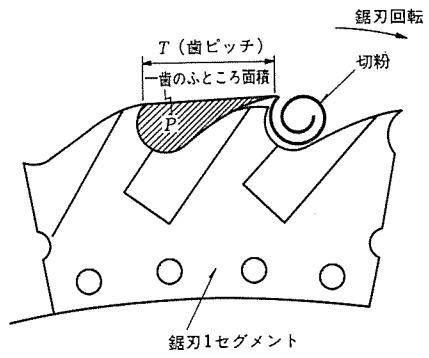


図 6. 高速度工具鋼 セグメンタル鋸刃 (HSS鋸刃)

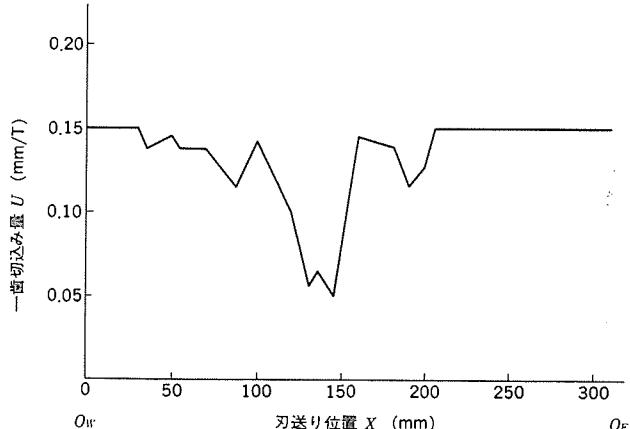


図 7. 刃送り位置と一歯切込み量の関係

$$Q = L \cdot U \text{ mm}^2 \quad k_2 \leq U \leq k_3$$

ここで、 $k_3 \cdot k_2$  は鋸刃が切削可能な一歯切込み量の上下限値である。切粉占積率  $k_1$  及び一歯切込み量上限値  $k_3$  は、鋸刃の種類や鋼管の仕様などにより異なるが、切断実績のフィードバックによりその最適値を見出した。

#### (3) 鋸刃送り速度の演算制御

次に鋸刃の刃送り速度は次式により求められる。

$$S = \frac{U}{T} \cdot V \text{ mm/s}$$

ここで、 $V$  は鋸刃周速 ( $\text{mm/s}$ )、 $T$  は鋸歯ピッチ ( $\text{mm}$ ) である。上式から明らかなように、最適切断を最短時間で行うためには、鋼管の仕様に適した鋸刃を選択し、前項で説明した鋼管切断沿面長さに応じた一歯切込み量の制御を行うことが必要である。三菱電機(株)は《MELPLAC》を使用して、切断開始前に演算した鋼管切断沿面長さの刃送り位置ごとの読み出しと一歯切込み量の演算をリアルタイムで実行することによりそれを可能とした。

図7.は各刃送り位置ごとの一歯切込み量の変化を示したものである。一方、鋸刃周速値は、鋼管の種類や鋸刃形状などにより決定されるが、三菱電機(株)は切断実績からその最適値を見いだしており、管種設定をすれば自動的にその値が選択されるシステムとした。以上の結果、刃送り速度  $S$  はその最適値がリアルタイムで演算されて刃送り機構に出力される。

#### (4) クランプ圧力演算制御

更に鋼管仕様の設定値にて、クランプ圧力を演算し設定する機能を設けることにより、切断に必要な設定操作はすべて自動化された。

次にクランプ圧力の計算式を示す。

$$P_r = k_4 \cdot \sigma \cdot \frac{t^2}{D} \text{ kg/cm}^2$$

ここで、 $\sigma$  は鋼管の抗張力 ( $\text{kg/mm}^2$ )、 $D$  は鋼管外形値 (mm)、 $t$  は鋼管肉厚値 (mm)、 $k_4$  は定数である。

### 3. 切断試験と結果

大形の HSS 鋸刃によるスラブ・棒鋼・レールなどの切断は、かなり古くから行われているが、シームレス鋼管の場合は比較的薄肉のものが多く、極端な断続切削となるため実施例はほとんどなく、わずかに TREMAG 社製 VRU-16 形切断機 2 台が、オーストリアの VÖEST 社で稼働しているにすぎない。更に HM 鋸刃は、刃先が超硬材であるがために一般に負の切削角、逃げ角とされ断続切削による起振力が大きくなる傾向があり、本機の出現まで世界にその使用例はなかった。

このような状況から本機の開発に当っては、製作試運転時において各種材質、肉厚、管径の異なる鋼管管数に対し、HSS、HM 鋸刃による切断試験を実施し、両鋸刃とも十分実用に供し得ることを確認した。

#### 3.1 鋸刃

表 2. に今回試験に使用した鋸刃の仕様を示す。この種の鋸刃は技術的に西独が最も優れており、HSS、HM 鋸刃とも西独 LENNARTZ 社に発注したが、今後は国内での調達も可能である。刃厚を考慮して厚目の 11 mm とした。

#### 3.2 被試験用鋼管

現在生産されている鋼管は極めて多種にわたるが、生産量の比較的多い表 3. に示すよう、管径 48.6 mm から 114.3 mm、肉厚 3.5 mm から 25.0 mm、抗張力 38  $\text{kg/mm}^2$  から 52  $\text{kg/mm}^2$  までのものを選択した。

#### 3.3 試験結果

前記の鋸刃及び被試験用鋼管を用い、自動制御装置と組み合わせて、種々の切削条件による切断試験を実施し、次に示すように実用範囲での結論を得た。

##### (1) HSS 鋸刃の適用範囲

被切削材として抗張力 38  $\text{kg/mm}^2$  以上を選び、切削速度 33.2~62 m/min の範囲で図 8. に示す組合せで試験を行い、判定基準として、切断面の状況（面粗度・光沢・ぱり・かえり）切粉の色調を主体に、

表 2. 試験用鋸刃の仕様

鋸刃種類	鋸歯外径 ( $\phi\text{mm}$ )	鋸刃厚 (mm)	セグメント数	鋸刃数	すくい角 ( $^{\circ}$ )	逃げ角 ( $^{\circ}$ )	歯材質
HSS 鋸刃	1,610	11.0	40	400	15	8	DIN DMo5 (JIS SKH-9)
				320			
				240			
HM 鋸刃	1,600	11.0	...	240	-15	-8	P40 Special

表 3. 試験切断用鋼管

管外径 × 肉厚 (mm)	材質
48.6 × 3.5	STKM-13 C (52 $\text{kg/mm}^2$ )
48.6 × 5.1	STPG-38 (38 $\text{kg/mm}^2$ )
114.3 × 6.5	STKM-13 C (52 $\text{kg/mm}^2$ )
114.3 × 7.0	STPG-38 (38 $\text{kg/mm}^2$ )
114.3 × 20.0	STKM-13 A (38 $\text{kg/mm}^2$ )
114.3 × 25.0	STKM-13 A (38 $\text{kg/mm}^2$ )

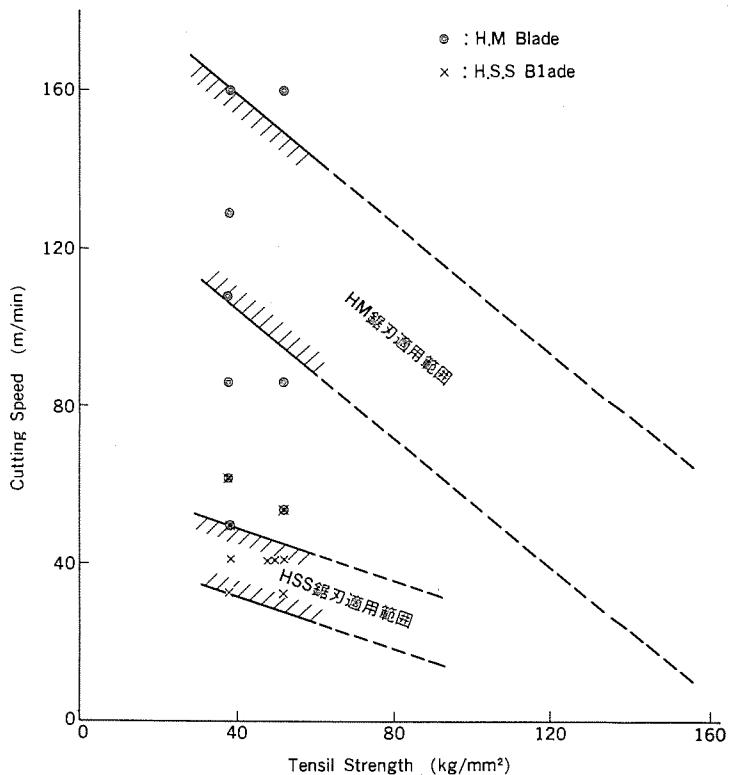


図 8. HM 鋸刃、HSS 鋸刃の被切削材強度と適用切削速度

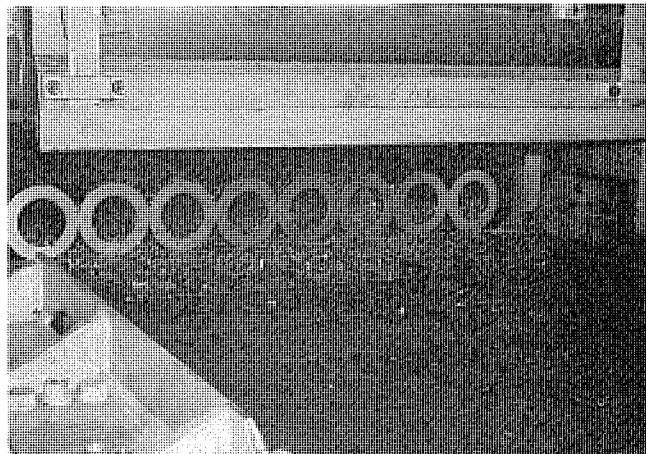


図 9. HSS 鋸刃による厚肉鋼管の切断状況  
( $\phi 114.3 \text{ mm} \times t20, \sigma_B = 38 \text{ kg/mm}^2$ )

振動、騒音、切削パワーなどを参考にして最適切削条件を求める結果、図 8. の HSS の範囲にあることが分かった。最適条件にかなり広い幅があるのは、主として鋼管の肉厚に関係しており、高速領域は管径 5% 程度の薄肉鋼管、低速領域は 20 mm 前後の厚肉鋼管に対する適用範囲を示す。

図 9. は  $\phi 114.3 \text{ mm} \times t20 \text{ mm}$ 、STKM-13 A を 33.2 m/min で切断し、クロップを排除した直後の状況を示し、図 10. に切断面の状況を示す。一般的に HSS 鋸刃は、安定した静肅な切断状況を示し切断面はバイトによる加工面に類似で、ぱり、かえりはほとんどなく良好な結果が得られた。

##### (2) HM 鋸刃の適用範囲

切削速度 49.6~161 m/min の速度範囲で、表 3. の鋼管のすべてを切断し、HSS と同様な判断基準によって適用範囲を求める結果を図 8. の HM に示す。HM 鋸刃の特長は高速切断による高生産性に

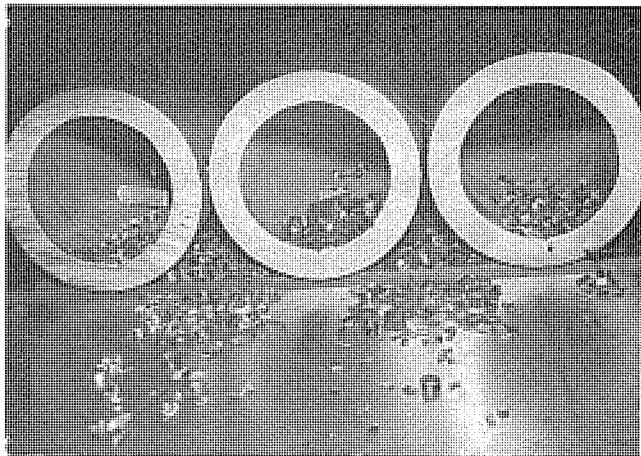


図 10. HSS 鋸刃による切断面の状況

表 4. 連続切断における標準正味切断時間 (HSS 鋸刃による)

鋼 管	管 数/層	正味切断時間(s)	
		38kg/mm <sup>2</sup>	52kg/mm <sup>2</sup>
26.4 × 2.87	36	30.3	42.9
33.2 × 6.35	28	28.1	40.1
42.6 × 4.85	22	28.5	40.7
48.3 × 3.68	20	29.7	42.3
60.3 × 4.83	16	31.6	44.9
60.3 × 6.45	16	43.5	61.9
73.0 × 5.51	13	36.5	51.9
73.0 × 7.01	13	43.2	61.3
88.9 × 6.45	11	39.9	56.7
88.9 × 7.34	11	39.9	56.7
88.9 × 11.40	11	46.5	66.1
114.3 × 6.35	8	38.7	56.4
114.3 × 8.56	8	40.0	56.9
127.0 × 5.59	7	40.0	56.7
127.0 × 9.19	7	43.2	61.3
139.0 × 5.69	7	46.5	66.7
139.0 × 10.54	7	50.1	71.2

あるが、切刃の形状が負の切削角・逃げ角を採用しているために、抗張力  $50 \text{ kg/mm}^2$  以下で伸びの大きな材料の場合、若干かえりが大きく出る傾向があり、切刃の形状について今後検討の余地がある。また、振動、騒音は比切削抵抗が HSS と比較し大きいために大きくなる傾向がある。

HM 鋸刃による切断は、まだ始められたばかりであり、今後改善すべき余地を残しているが、極めて高効率の切断が可能であり、今後の発展が期待できる。

### (3) HSS 鋸刃による正味切断時間

今回実施した種々の試験結果をもとに、HSS 鋸刃による代表的な鋼管のオンラインにおける正味切断時間を計算により求めた結果を表 4. に示す。また、HM 鋸刃の正味切断時間は、図 8. から分かるように同一歯数で同一送りとすれば、3 倍以上の高効率となるが鋸刃の寿命を考慮すると 2 倍程度と見るのが妥当であろう。

## 4. む す び

以上、今回製作した VRU-16 形丸鋸鋼管切断機の概要を述べたが、結論として本機の場合、HSS、HM いずれの鋸刃に対しても、十分鋸刃のもつ性能を引き出し、優れた切断性能を示すことが分かった。試作を通して、種々得難い経験を積んだが、丸鋸による鋼管の切断は、断続切断によって発生する振動を如何にして小さく抑えながら、時々刻々変化する切断沿面長に対し、常に最適の送りを与える制御を如何にするかにつきる。この問題が解決されたとき、鋸刃及び駆動系には、無理な力が発生せずスムーズな切断が可能となり、鋸刃は所期の性能を発揮するばかりでなく長寿命となる。特に HM 鋸刃の場合、高速切断を可能にしないとその効果は半減することもあり、振動に対する考慮が不確実では使用する意味がない。

丸鋸による鋼管の大量同時高速切断の技術は、生まれてまだ日が浅く、未開発の技術が多々あり、今後の技術発展により飛躍的な性能アップの可能性を含んでいる。その第一は HSS 鋸刃であり、第二は HM 鋸刃である。これらの鋸刃の適用限界は刃先材質により左右され、突然の性能飛躍も期待できよう。

最後に本機の開発に御尽力いただいた住友商事(株)、大阪重化工機部各位に対し、厚く御礼申上げる次第である。

# 三菱広域監視制御装置《MELFLEX》のシリアルIO

村田尚生\*・犀川真一\*・山根信吾\*・田中英和\*

## 1. まえがき

最近の遠方監視制御システムは、システム内で取り扱う情報量及び情報を加工処理する内容が従来に比べ格段に増加かつ高機能化している。この需要にこたえるため、三菱広域監視制御装置《MELFLEX》においても従来の8ビットマイクロプロセッサを中心とした構成を、16ビットアーキテクチャ採用の機能分担形マルチマイクロプロセッサ構成とすることにより、高機能化・高速化・大容量化へ対処してきた。

しかし処理容量の増大は入出力点数の増大を伴い、処理部とプロセス又はマンマシンとの間の配線(ケーブル数)の増大へつながり、これへの対処も重要なポイントとしてクローズアップされてきている。このことは最近のニーズであるIO分散設置傾向にも相通じるものであり、シリアルIO開発にて解決を図ったので紹介する。

## 2. 概要

三菱広域監視制御装置《MELFLEX》の基本的アーキテクチャはマルチマイクロプロセッサ構成による処理部とプロセス又はマンマシンとのインターフェースを行うIO部により構成している。ここで処理部とIO部間接続はIO用低速バスの延伸であり、このバスの延長距離の制限上、IO部を処理部至近におきIOとプロセス・マンマシン間の接続ラインを延ばす形での結合形態をとらざるを得なかつた。この結合形態はIO各点をケーブル一点一点で結ぶものであり、ケーブル量を多く要した。

シリアルIOは上記の改善であり、処理部とIO部間を距離制限が少なく、かつ線数の少ないシリアルラインで延長し、IO部をプロセス・マンマシン至近に設置可能とするものである。

シリアルライン化により並直列変換、直並列変換の各機能と通信制御の機能が新たに必要となるが、この部分のハードウェア量の増大をセミカスタムLSI(CMOSゲートアレー)により吸収させて小形化・高信頼度化・低電力化を実現している。

シリアルライン化による効果は次のとおりである。

- (1) IO分散指向への対応
- (2) IOまでの配線のコンパクト化
- (3) IO～処理部間距離の増大(10m→200m)
- (4) IOの活線挿抜可能によるメンテナンス性向上

このシリアルIOシステムを有効なものとするためには、前記追加機能分のLSI化並びにIOの分散化に適した実装法、高信頼度化へのRAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能向上が重要である。以下これらについて述べる。

## 3. シリアルIOシステム

### 3.1 シリアルIOの構成

処理部側にマスタモジュール(以下、CONTと称す)をおき、プロセス・マンマシン側にリモートターミナルモジュール(以下、RTと称す)をおき、CONTとRTを2心のワイヤレスペア線で1:N(N≤16)にてシリアル結合する。

CONTにIOデータメモリを内蔵し、並列入出力データの中継バッファとする。プロセッサからRTへのデータ入出力は上記IOデータメモリへの入出力動作により完結し、IOデータメモリ～各RT間のデータ通信はセミカスタムLSI(シリアルIO-LSI)により自律的に定期周期伝送する。

表1. シリアルIO概略仕様

シリアルIO-LSI仕様	
(1) 形	名: M56307-020 S
テクノロジ	CMOSゲートアレー(2層メタル配線)
ゲート数	2,600ゲート(2入力NAND換算:内、使用率=約88%)
パッケージ	68ピンPIP
電源	5V±10%, 10mA
(2) 通信制御	ボーリング
(3) 同期方式	ワード同期
(4) ワード構成	22ダイビット/ワード
(5) 誤り制御方式	隣接位相反転照合とパリティ併用
(6) 伝送速度	max 250Kb/s
(7) RT数	max 32
(8) サブコミアドレス	max 32
シリアルライン仕様	
(1) 対向方式	1:N(N≤16)
(2) 伝送路	ワイヤレスペア線
(3) 变调方式	ベースバンド変调
(4) 伝送方式	ボーリング伝送方式によるマルチドロップ方式
(5) 通信速度	約100Kダイビット/s
(6) 伝送距離	max 200m(Φ0.9mm伝送路にて)
(7) 同期方式	ワード同期
(8) 誤り検定方式	隣接位相反転照合とパリティ併用(制御は左記+定マーク)
(9) 伝送単位	16ビットデータ一括
(10) 伝送能力	40サイクル/s以上
マスタモジュール仕様	
(1) 制御チャネル数	2ch/モジュール
(2) 制御RT数	max 16 RT/ch
システム仕様	
マスタモジュール数: max 16モジュール/プロセッサ (i.e. max 512 RT/プロセッサ)	

### 処理部

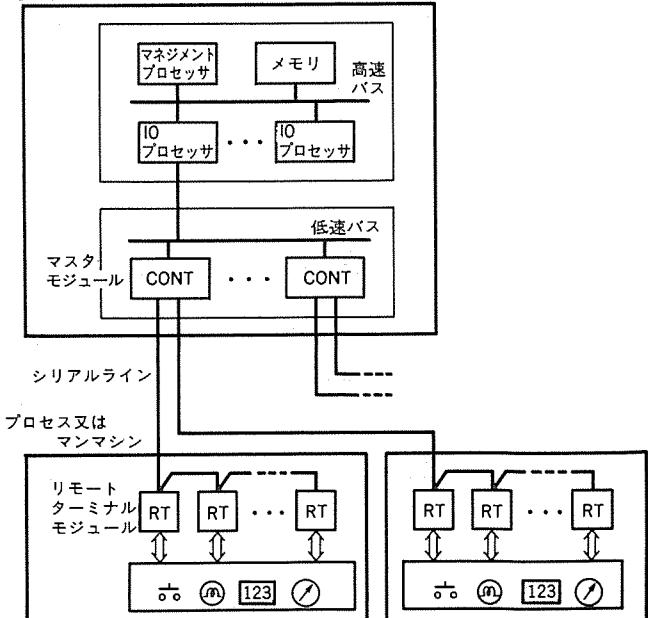


図1. シリアルIOシステム構成のブロック図

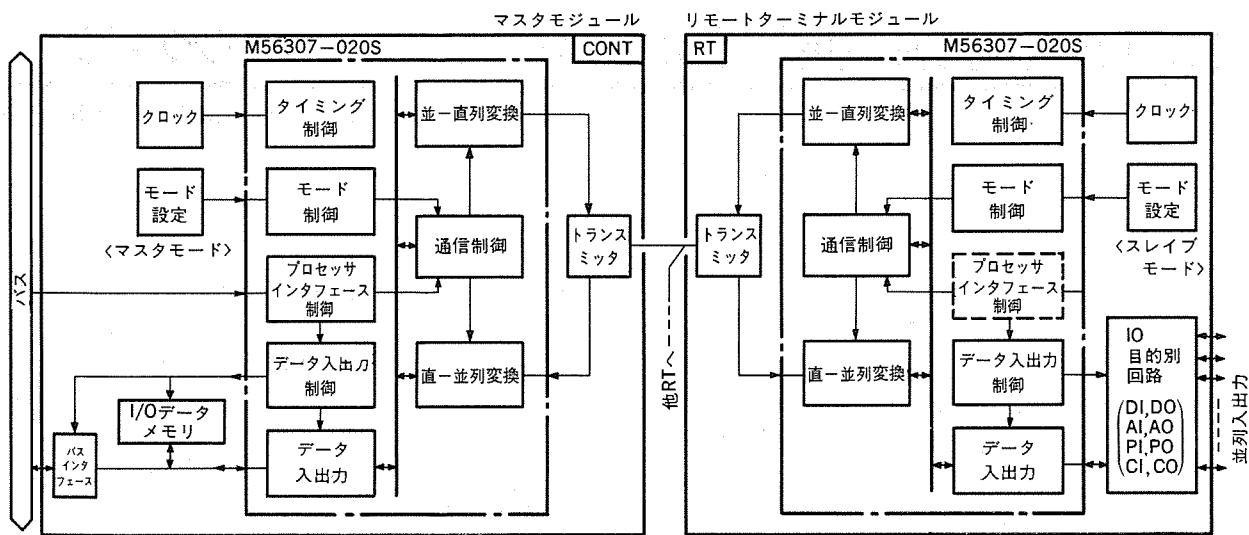


図 2. シリアル IO ブロック図 (一点鎖線内が LSI 化範囲)

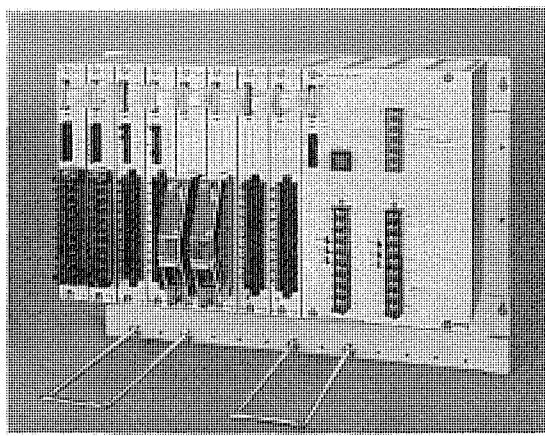


図 3. シリアル IO リモートターミナル (RT) の外観

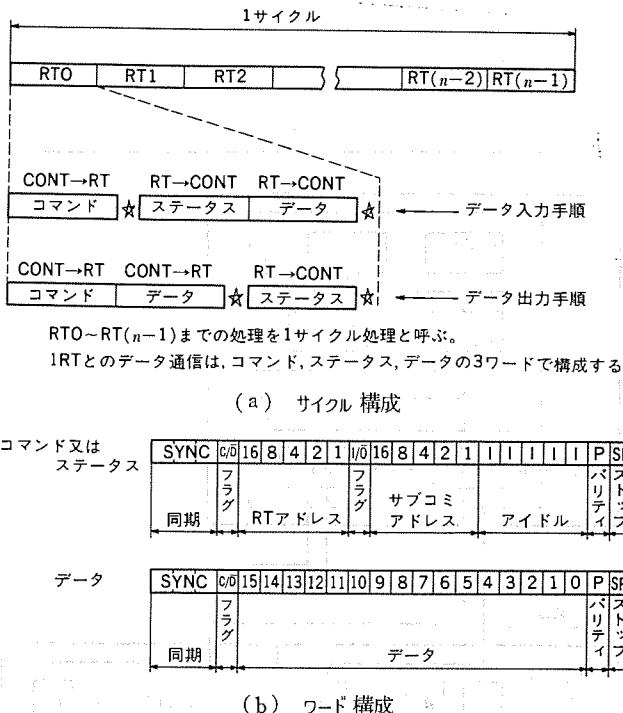


図 4. データ通信フォーマット

表 1. IC シリアル IO システムの概略仕様、図 1. と図 2. に ブロック図、図 3. に リモートターミナル (RT) の外観写真を示す。

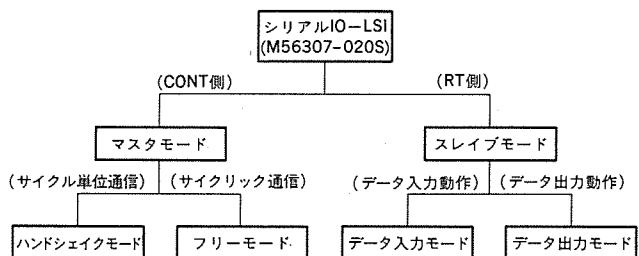


図 5. シリアル IO-LSI のモード分類

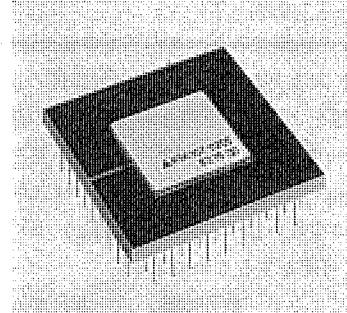


図 6. シリアル IO-LSI の外観

### 3.2 シリアル IO データ通信フォーマット

CONT～RT 間は、CONT 側をマスタとするポーリング伝送方式とし、そのフォーマットを図 4. に示す。

### 3.3 シリアル IO-LSI の概要

前述のとおりシリアルライン化に伴い増加するハードウェア量をセミカスタム LSI (シリアル IO-LSI) により吸収されている。このLSIはマスタスライス方式のCMOSゲートアレーを採用し、開発にあたり次の点を特に考慮した。

- (1) CONT 側、RT 側とも同一の LSI にて構成可能であること。
- (2) マイクロプロセッサの支援なく動作可能であること。これは RT 側において必要とし、汎用の通信制御用 LSI (例えば 8251, 8273 など) を使用しない理由である。

シリアル IO-LSI は、使用場所、用途に応じ図 5. に示すモード分類を持ち、モード設定は LSI 外からハードウェアにより行う。図 6. にシリアル IO-LSI の外観を示す。

### 3.4 シリアル IO 動作概要

CONT が RT を順次呼び出して、RT から CONT へデータを入力

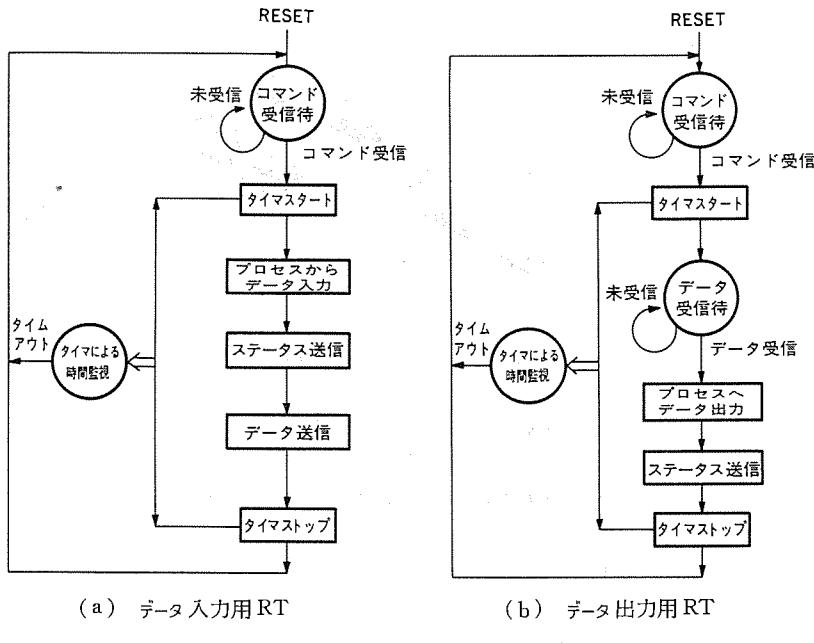


図 7. リモートターミナル (RT) の動作フロー

表 2. リモートターミナルモジュール 仕様

#### デジタル入力

方 式	入力点数	入力印加電圧(V)	入力流出電流(mA)	絶 緑	備 考
オープンコレクタ又は無電圧 a 接点入力	32/16	24	10~15	有り	50ms 間時入力対応は16点入力

#### デジタル出力

方 式	出力点数	出力印加電圧(V)	出力駆動電流(mA)	絶 緑	備 考
オープンコレクタ出力	32	30	70	無し	ダーリントン出力
オープンコレクタ出力	32	30	30	無し	
オープンコレクタ出力	32	32	150	有り	ダーリントン出力
無電圧 a 接点出力	32	AC 250	200(220V)		
		DC 125	200(24V)	有り	

#### アナログ入力

方 式	入力点数	入力レベル	精度(%)	絶 緑	備 考
電圧/電流入力	8	-5~+5V 電圧入力はシヤント抵抗により0~1Vに変換後入力	電圧入力 …±0.2 電流入力 …±0.3	有り	フライングキャビシタ入力

#### アナログ出力

方 式	出力点数	出力レベル	精度(%)	絶 緑	備 考
電圧出力	8	-5~+5V	±0.2	無し	
電流出力	2	0~20mA	±0.3	有り	個別絶縁

したり、CONT から RT へデータ出力する“ボーリング・セレクティング動作”によりデータ送受信する。以下、動作概要をプロセッサから RT まで順を追って説明する。

プロセッサは CONT 内シリアル IO-LSI(マスターモード)に対し、各種レジスタの初期設定を行う。初期設定完了後 サイクル起動命令を与えると、

シリアル IO-LSI は各 RT とのデータ通信を開始する。この LSI はデータ通信のモードとして、1 サイクル処理(1 チャネルあたり最大 16 RT との通信)が完了するごとに RT との通信を停止し、プロセッサからの再起動に備えるハンドシェイクモードと中断なく サイクリックに通信するフリーモードの 2 種類のモードを持つが、シリアル IO ではハンドシェイクモードにより動作させている。

各 RT に対しシリアルラインを介し、図 4. に示す通信フォーマットに従い RT アドレスの順にデータ通信する。シリアルライン上には CONT～RT 間のデータ通信信号が直列(シリアル)符号形式で流れる。シリアルライン波形はパルス変調による交流であり、極性は無極性である。RT にはデータ入力用とデータ出力用があり、各々はシリアル IO-LSI(スレーブモード)によりデータ通信フォーマットにおいて規定するデータ入力手順、データ出力手順に従い応答する。動作フローを図 7. に示し、プロセスマンマシンインターフェース仕様を表 2. に示す。

#### 4. 実装法及び実装部品

シリアルライン化による IO の分散設置に対応しうる新たな実装法として、次の目標を設定した。

- (1) カードバスケット構造を追放する。
- (2) プロセス入出力信号線を RT 前面に直接接続可能とし、コネクタ接続又はねじ止め接続の両方とも可能とすること。
- (3) 実装場所を選ばないこと。すなわち、グラフィックパネル、制御卓内実装はもとより、壁掛け、卓上などの外部設置にも十分満足できるデザイン、構造であること。
- (4) メンテナンス、活線挿抜が容易であること。
- (5) IO 部と処理部間の構造的分離による耐サージ能力の向上。

上記目標を十分満足しうるものとして、新たに採用したカートリッジ化実装法とその実装部品について述べる。

##### 4.1 カートリッジ化実装法

従来はカードバスケットを実装単位とした実装法であった。すなわち、カードエッジ形プリントカードをカードバスケットに収容し、架に積み重ねる方法であった。今回のシリアルライン化により、プリントカード間の信号線数が大幅に削減でき、プリントカードをケースに収容したもの(カートリッジと呼ぶ)を実装単位としたカートリッジ化実装法を採用した。図 8. に RT 実装構造図を示す。この構造は、マウンティングベースに RT を必要数固定し、シリアルラインケーブルを挿入することにより RT パッケージが構成できる。必要 RT 数にあわせて自由なパッケージを容易に構成でき、実装制約を大幅に改善することができた。プロセス入出力信号線は RT 前面に直接接続可能である。

##### 4.2 実装部品

前記カートリッジ化実装法の採用にあたり、各種実装部品の開発を行ったので、その中で主な実装部品であるケース、コネクタについて、構造、特長を述べる。

###### (1) RT ケース

プリントカードを収容し、それをマウンティングベースに固定するためのものである。高さ 250 mm、幅 33 mm、奥行 192 mm のサイズで、前面にプロセス入出力信号線コネクタの窓とシリアルラインコネクタ窓、マウンティング固定ねじを備えている。またメンテナンス性の向上のため、ケースにつめを設けてあり、固定ねじを外しても落下しない構造になって

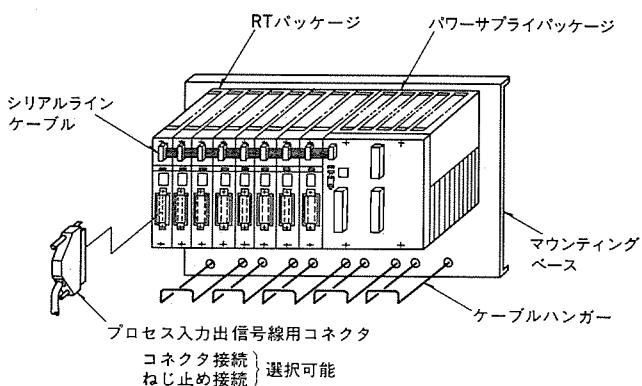


図 8. リモートターミナル (RT) の実装構造図

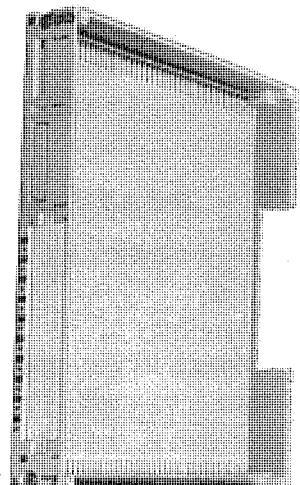


図 9. リモートターミナル (RT) 用ケースの外観

いる (図 9. 参照)。

(2) プロセス入出力用コネクタ

プロセス入出力信号線は、一括ケーブル接続が可能な場合と多方向から個別に接続される場合がある。このような状況に対処するべく、RTの固定側コネクタは共通とし、相手側可動コネクタは一括ケーブル接続用のコネクタとねじ止め端子台コネクタの2品種を用意している。状況に応じて選択が可能である。接続線径はコネクタ接続用で0.3～0.75 mm<sup>2</sup>まで、ねじ止め接続用で2 mm<sup>2</sup> (圧着端子を選択すれば3.5 mm<sup>2</sup>)まで可能である (図 10. の左部分参照)。

(3) シリアルラインコネクタ

シリアル信号の接続と電源供給を行うものである。このコネクタは次の理由により一括圧接形を採用した。

(a) 分散設置の際、自由な箇所にコネクタを接続できること。

(b) システム拡張時も活線状態で分枝接続できること。

(c) 接続工数を大幅に削減できること。

また圧接作業の安全性、容易性、操作性の向上のため、ワイヤガイドカバー、引抜タブを設けてある。適合電線は0.3 mm<sup>2</sup>のディスクリートワイヤで、要求仕様に対して十分な太さを持っている (図 10. の右部分参照)。

## 5. RAS機能の向上

シリアルIOでは次の4点を目的とし、RAS機能の向上を図っている。

- (1) シリアルライン機能のハングアップ防止
- (2) 故障モジュール検出の容易化

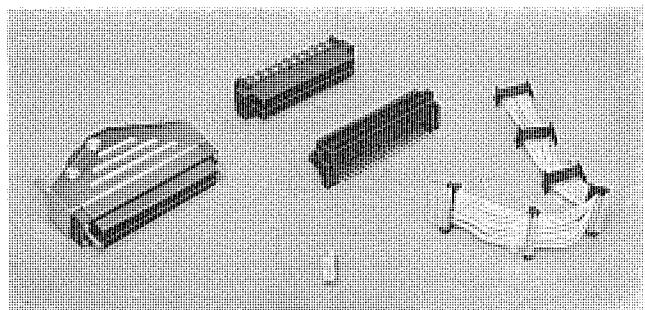


図 10. リモートターミナル (RT) 用コネクタの外観

### (3) 活線メンテナンス機能の実現

### (4) メンテナビリティの容易化

#### 5.1 シリアルライン機能のハングアップ防止

シリアルIO-LSIは、データ通信における一時的なラインの乱れや特定RTのダウンによるハングアップの防止策としてのタイマ監視機能を内蔵している。

CONT側では、各RTとのデータ通信を常にタイマ監視しており、一定時間経過しても通信が完了しない場合タイマアウトとし、当該RTとの通信を強制終了させ、次のRTとのデータ通信に移行する。一方RT側では、コマンド受信をトリガとしてタイマ監視を開始し、一定時間経過してもデータ通信が完了しない場合、タイマアウトとし、RTをコマンド受信待状態へ復帰させる。

#### 5.2 異常表示

シリアルライン上の故障モジュールがすぐに分かるように、CONT側、RT側双方に異常を示す表示を設けている。

電源異常、シリアルIO-LSI動作異常、その他シーケンス異常を自己判断し、その結果を表示する。

#### 5.3 活線メンテナンス機能

シリアルラインは、伝送用トランジスタで絶縁した形で各モジュールとマルチドロップ方式にて結合しており、特定RTモジュールのトラブルが全体に波及しない構成となっている。更に、構造面においても前面コネクタで接続するようにしており、着脱が容易に行える。したがって活線でのRT交換等のメンテナンスが可能であり、メンテナンス性の向上を図っている。

#### 5.4 メンテナビリティの容易化

シリアルIOシステムのメンテナンスを容易にするため、下記の機能を持つメンテナツルを用意している。

##### (1) 動作モニタ機能

CONTと各RTとの間で授受されているデータをモニタし、指定されたRTのデータを液晶表示器上に表示する。

##### (2) 模擬CONT機能

CONTの代替機能を果たす。シリアルライン上の出力データ/入力データの設定/表示を行う。

##### (3) 模擬RT機能

特定RTの代替機能と全RTの代替機能を果たす。シリアルライン上の出力データ/入力データの表示/設定を行う。

##### (4) データ通信トレース機能

データ通信手順に用いられるコマンド、ステータス、データの各ワードを最大512ワードトレースする。

## 6. 適用例

- (1) 《MELFLEXシリーズ》へのシリアルIO適用例を図11.に示す。

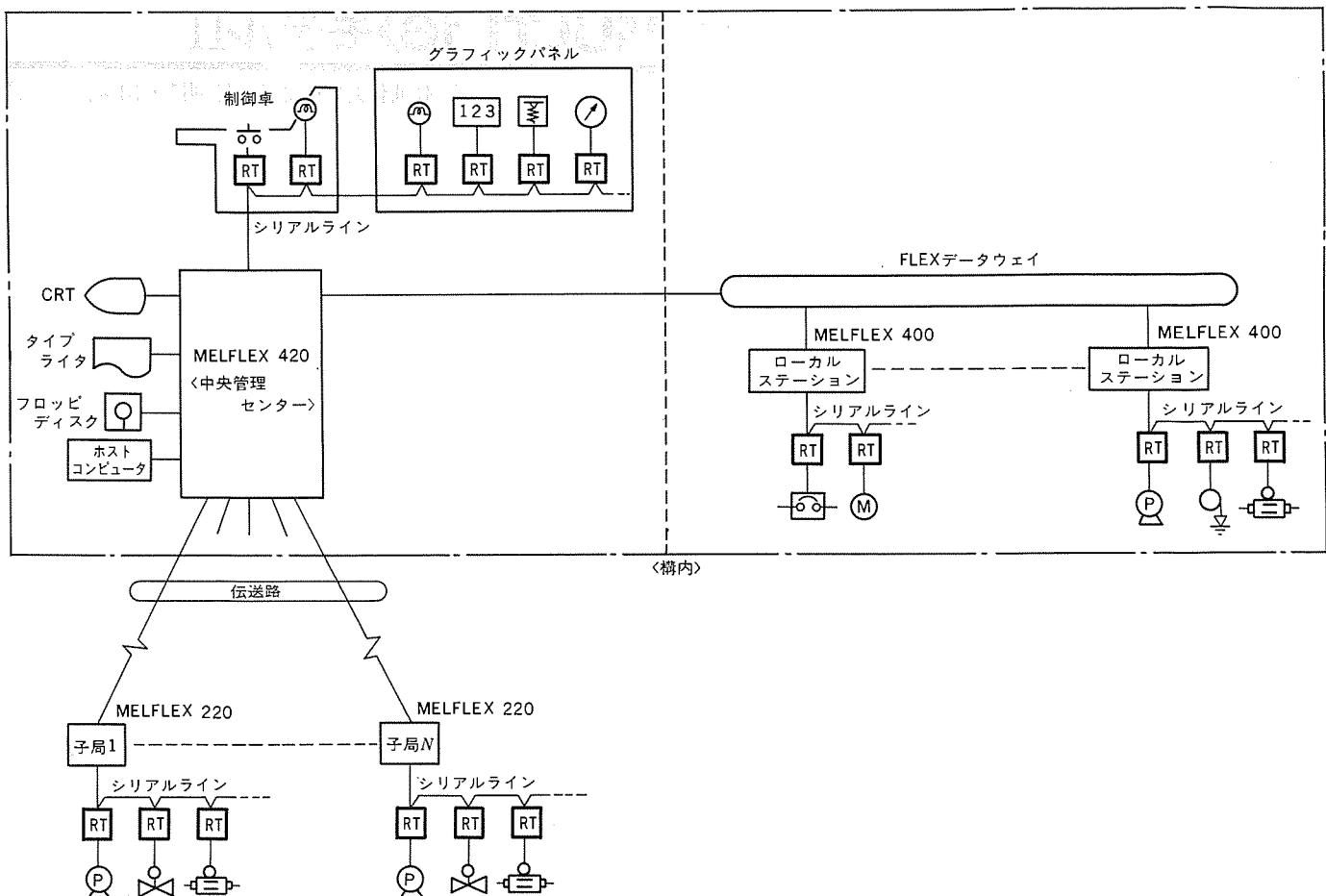


図 11. 《MELFLEX シリーズ》へのシリアル IO 適用例

中央管理センターには《MELFLEX 420》，中央管理センターと同一構内のローカルステーションには《MELFLEX 400》，更に構内から遠く離れた子局には《MELFLEX 220》，を適用している。中央管理センターでは，制御卓，グラフィックパネル内のスイッチ，ランプ，表示器，記録計，メータ類の情報を，またローカルステーション及び子局では，現場プロセス入出力情報を各々プラント・プロセスの監視・制御対象としている。

(2) 二重系構築の場合は，シリアルラインにて系切換を行うものとする。図 12. にその適用例を示す。

## 7. む す び

以上，《MELFLEX》のシリアル IO 化について，その概要を述べた。シリアル IO 化により，プロセス入出力のコンパクト化が達成でき，かつ経済的なシステム構築が可能となりユーザー各位の期待に十分こたえるものと確信する。LSI の進展は目ざましく，遠方監視制御システムへのインパクトも今後とどまるを知らないであろう。今回の開発をベースに更に，①高速化，②高機能化，③低価格化を目指してまい進す

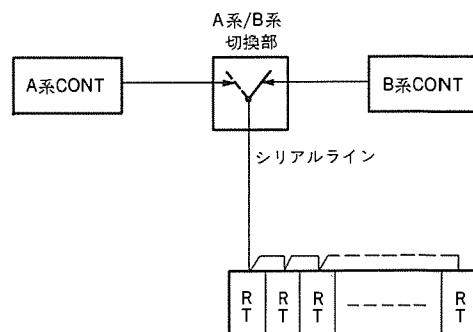


図 12. シリアル IO の二重系構築

る所存である。

最後に，各種構造部品開発，LSI 開発に際し御協力いただいたコネクタメーカーほか関係各位に対し謝意を表する。

# 三菱パーソナルコンピュータ《MULTI 16》モデルII

鈴木昭夫\*・牧野友明\*・山崎眞\*

## 1. まえがき

業界初の本格的 16 ビットパーソナルコンピュータ（以下、16 ビットパソコンと称す）《MULTI 16》の上位機として《MULTI 16》モデルII を商品化した。《MULTI 16》モデルII は、i 8086 の高速版（8 MHz）を使用し、大幅に処理性能を向上させるとともに、マルチタスク OS（コンカレント CP/M）の使用も可能である。

主メモリに 256 K バイトの RAM を標準装備し、CRT の表示メモリや漢字 ROM を含めると、実に 704 K バイト（カラーモード）のメモリが基本構成に組み込まれ、日本語処理や高位プログラム言語の使用により増大したデータ量・演算処理量を完全にカバーし、高速処理を実現している。また RS-232 C、セントロニクスインターフェース、漢字 ROM も標準装備し、システムの規模拡大の要求にも余裕を持って対応できる。そしてキーボードには、JIS キーボードのほかに、ワープロ用キーボードを選択することができ、日本語ワープロとして専用機みなみの機能を発揮する。《MULTI 16》モデルII には、基本構成要素の違いにより、MP-1642、MP-1645 の 2 機種（本体部）がある。

本稿では《MULTI 16》モデルII のシステム概要、ハードウェアとソフトウェアの特長、機能及び構成について述べる。図 1. は《MULTI 16》モデルII の外観である。

以下、本稿では、従来機種《MULTI 16》に対し、《MULTI 16》モデルII を《MULTI 16-II》と表現している。

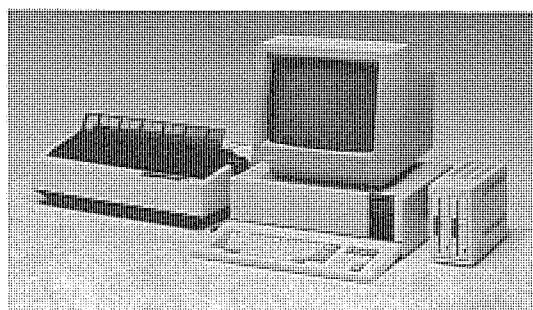


図 1. 《MULTI 16》モデルII の外観

## 2. 開発のねらい

業務用パソコンの推定国内出荷台数は、昭和 58 年度に 16 万台を突破し、今後年率 10 割を越えて成長すると予想されている。先発のパソコン《MULTI 16》は、大きなメモリ空間をもち、日本語処理やマルチ言語といった多彩な機能をもつ業務用パソコンとして高い評価を得ている。《MULTI 16-II》はその上位機として、これらの機能を大幅に向上させ、成熟しつつある 16 ビットパソコン市場に十分耐える高速多機能パソコンとして開発された。

業務用パソコンの必要条件として、ユーザーがパソコンに求める機能は次のように要約される。

(1) 実務に密着した使いやすいソフトウェア、ハードウェア、及び周辺装

置が豊富であること。

(2) 処理速度が速いこと。

(3) ホストコンピュータとオンライン接続が容易で、OA トータルシステムが構成できること。

(4) 美しいデザインがオフィスと調和すること。

以上のような市場動向を背景に開発された《MULTI 16-II》は、次のような基本的特長をもっている。

(1) 処理速度が《MULTI 16》に比べ 2.8 倍となり、高速化された。

(2) 《MULTI 16》の豊富なソフトウェア、周辺機器がそのまま使用可能である。

(3) セパレートタイプで、周辺機器の選択、変更が自由にできる。

(4) コンカレント CP/M により、マルチタスクが可能である。

(5) パソコン OS のもう一つの潮流である MS/DOS のサポートにより、更に広範なソフトウェアの活用が可能である。

(6) オンラインエミュレータソフトの改良や、通信回線機能の強化により端末機として最適である。

(7) 本体及び各ユニットのデザインは、美しい「OA デザイン」で統一され、他のオフィス機器にじみやすい。

表 1. 《MULTI 16》モデルII システム仕様

諸元		仕様
中央処理装置 (CPU)		16 ビットマイクロプロセッサ i 8086-2 (8 MHz) 高速演算プロセッサ i 8087-2 (8 MHz) (オプション)
メモリ	主メモリ (RAM)	256 K バイト (パリティビット付き) メモリ追加 256 K バイト (オプション) 基本 256～最大 512 K バイト
表示	表示用メモリ (RAM)	64 K バイト (MP-1642) 192 K バイト (MP-1645)
機能	日本語 ROM	128 K バイト (JIS 第 1 水準) 128 K バイト (JIS 第 2 水準) (オプション)
表示	サイズ	12 インチ/14 インチ
機能	色	グリーン/カラー (8 色)
表示	グラフィック表示	640×400/450 ドット ラスタスキャンインターレース (ドットごとに色指定可)
機能	文字表示数	英数・カナ使用時…80 字×25/20 行 日本語使用時…40 字×25/20 行
能	文字種	英数、カナ及び图形記号 256 種 (8×16 ドット) 日本語及び全角文字 第 1 水準 2,965 字 非漢字 453 字 第 2 水準 3,384 字 (オプション)
内蔵インターフェース		フロッピーディスクインターフェース (ミニフロッピーディスクユニット 2HD 又は標準フロッピーディスクユニット接続用) RS-232 C インターフェース セントロニクスインターフェース 拡張用インターフェース (5 インチハードディスクユニット接続用)
カレンダー時計機構		年、月、日、時、分、秒 (バッテリバックアップ付き)
ミニフロッピーディスク電源		ミニフロッピーディスクユニット 1 台に供給可能

### 3. システム構成

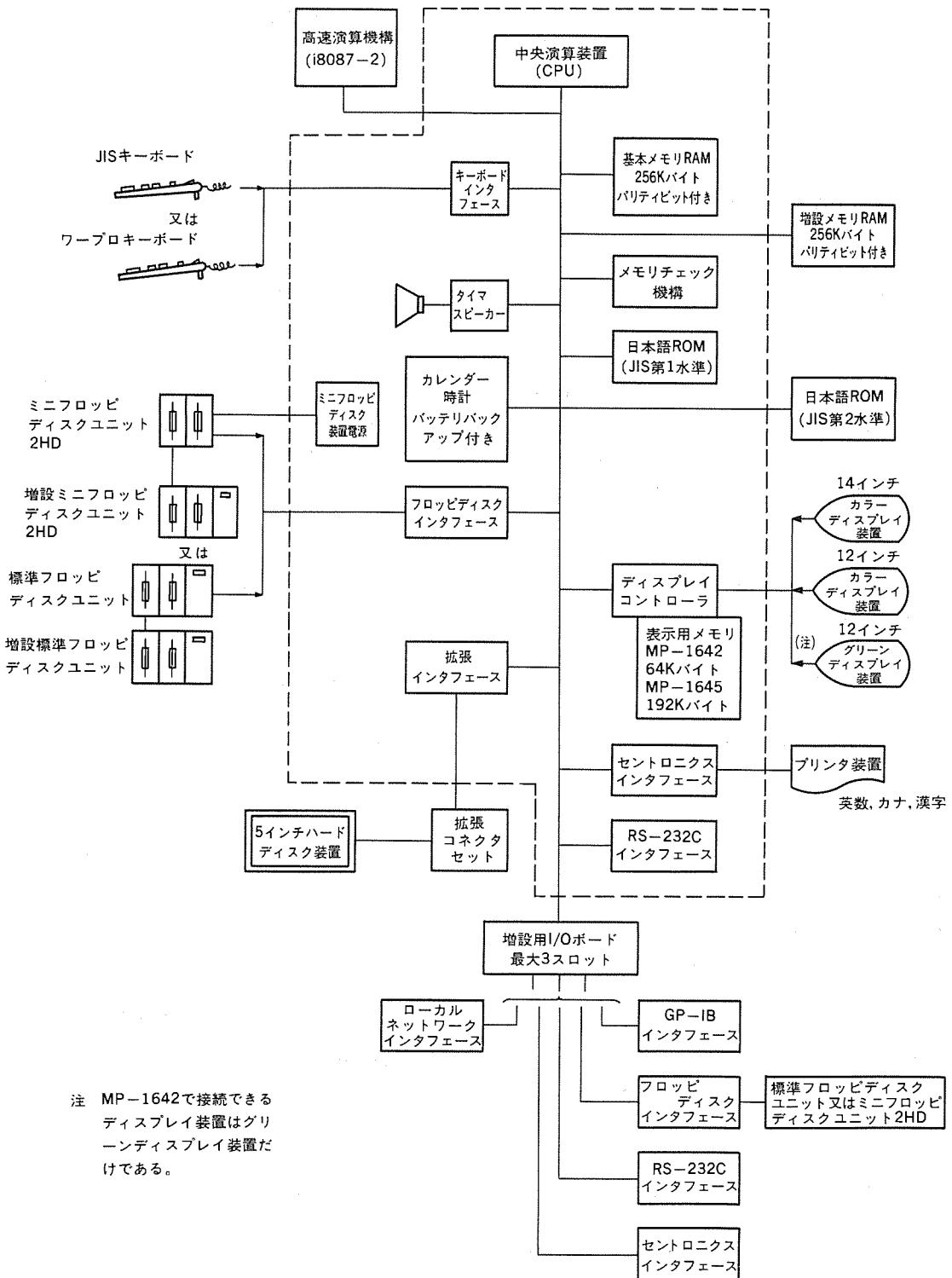
図2.に《MULTI 16-II》のシステム構成を、表1.にシステム仕様を示す。《MULTI 16-II》は、モノクロ(MP-1642)とカラー(MP-1645)用の本体がある。ディスプレイは、グリーン1機種、カラー2機種から、またフロッピディスクは、5<sup>1</sup>/<sub>4</sub>インチ(1Mバイト)、8インチ(1Mバイト)のどちらでも自由に選択し構成することができる。

### 4. ハードウェアの特長

#### 4.1 高速版16ビットマイクロプロセッサ

(1) 16ビットマイクロプロセッサ i8086-2を採用し、メガバイト級のアドレス空間のもと、7.4MHzの実行速度で日本語CP/Mや高位言語を縦横に駆使し、本格的な日本語による高速処理を実現している。

(2) オプションの高速演算プロセッサ i8087-2を付加することによって、FORTRAN、BASICのユーザーに対し、画期的な高速演算性能を提供している。



## 4. 2 I/O オプション機器の継続性

(1) CPU カードの内部データバスは、主メモリに対し 16 ビット幅をもち、そのデータ転送レートを十分生かし、また外部 I/O とのインターフェースは、従来の《MULTI 16》の PC バス (データバス幅 8 ビット) をそのままエミュレートすることにより、既存の I/O カードや数多くのユーザー開発カードが接続でき、効率的な運用が行える。

## 4. 3 高解像度 CRT

(1) 従来の  $640 \times 400$  ドットに加え、 $640 \times 450$  ドットの拡張モードを持ったことにより、行間に余裕ができ、漢字が更に見やすくなり、またけい(野)線を自由に引くことができる。

(2) CRT はすべて防げん(眩)処理が施され、グリーン CRT 1 機種、カラー CRT 2 機種 (分解能 0.4 mm の高解像度形と分解能 0.31 mm の超高解像度形) の 3 機種の中から選択できる。

## 4. 4 大容量補助記憶装置

(1)  $5\frac{1}{4}$  インチ高密度形のミニフロッピディスク (1 M バイト) と、上位システムとのデータ交換が容易な 8 インチフロッピディスク (1 M バイト) のどちらも自由に接続可能としている。

(2)  $5\frac{1}{4}$  インチハードディスク (10 M バイト) を最大 2 台まで接続可能としており、高速大容量ファイルとして日本語処理及び OA アプリケーションに幅広く使用できる。

## 4. 5 漢字サポート

(1) 標準で JIS 第 1 水準漢字 2,965 字、非漢字 453 字を内蔵し、更にそれらを ROM 化したことにより、従来必要だった増設メモリの追加なしで日本語処理が可能となり、大幅に使いやすくなつた。またオプションで JIS 第 2 水準漢字も供給可能としている。

(2) 漢字表示は 40 字  $\times$  20 行モードのほかに、40 字  $\times$  25 行モードもあり、漢字を無理なく 1 画面 1,000 文字を表示することができる。

## 4. 6 ワープロキーボード

(1) 従来の JIS キーボードのほか、ワープロ用のキーボードが選択できる。ワープロ用キーボードは、ワープロソフト実行時における操作性を大幅に向上させると同時に、通常のパソコン用としても使えるように、JIS キーボードに存在するキーはすべて持っている。

(2) 人間工学から生まれた薄形の使いやすいキーボードで、作業者の好みに合わせて  $6^\circ$ ,  $15^\circ$  の傾斜角調節ができる、操作性の向上を図っている。図 3., 図 4. に各キーボードのキー配列を示す。

## 4. 7 セパレート構造

(1) ハードウェア構造は、システムが自由に構成できるセパレートタイプで、ディスプレイ、フロッピ、キーボードの 3 ブロックからなり、必要に応じてシステムアップが可能となっている。

(2) カラーディスプレイには、オプションで上下、左右自由に調節可能な専用表示装置台が準備されており、より一層見やすくなっている。

## 4. 8 システムの拡張

(1) 本体部には従来の《MULTI 16》の最大構成に近い、RS-232 C、セントロニクス、及び拡張インターフェースを標準構成でもち、そのままで十分各要求に対応できる。更にオプションの JIS 第 2 水準日本

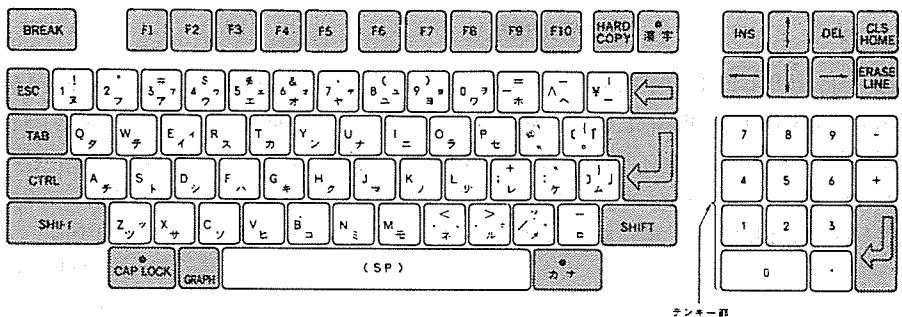
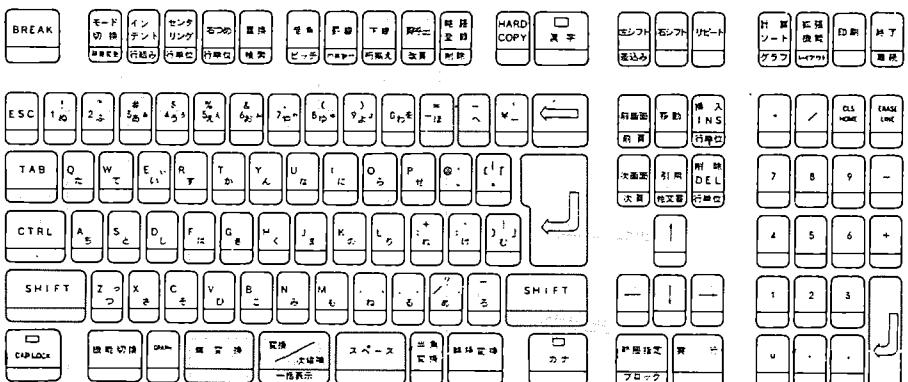


図 3. 《MULTI 16》モデル II JIS キーボードのキー配列



図中の上段、下段の表示は上段はキートップ上部に表示し、下段はキートップ前面に表示してある。



図 4. 《MULTI 16》モデル II ワープロキーボードのキー配列

語 ROM カード、及び増設メモリ用にそれぞれ専用のスロットを本体内に内蔵している。

(2) 上記 (1) の構成をこえるシステムには、更にオプションの増設 I/O ボードを装着することにより、GP-IB インタフェースカードやユーザー I/O カードを最大 3 枚まで実装することができる。

## 4. 9 その他

### (1) 自己診断 ルーチンの内蔵

電源 ON とリセット時、本体内の ROM 上に内蔵された自己診断ルーチンにより CPU, ROM, RAM、及び各 LSI を診断し、異常のときはディスプレイ上に故障原因を表示する。

### (2) スピーカーの音量調節

本体背面にあるボリュームを変化させることにより、音量の調節が可能となっている。

## 5. 基本処理装置

### 5. 1 概要

基本処理装置は本体部に内蔵され、フロッピ制御ボード、CRT 制御ボード、メインボードの 3 枚から構成されている。メインボードには、CPU, ROM, RAM, RS-232 C, セントロニクスインターフェース、キーボードコントローラ、及びその他の機能が内蔵されている。

### 5. 2 CPU

(1) 《MULTI 16-II》では、《MULTI 16》で使用の i 8088 (5 MHz 版) とソフトウェア的には互換性をもち、ハードウェア的には、16 ビットデータバスを持つ高性能 16 ビットプロセッサ i 8086-2 (8 MHz 版) を採

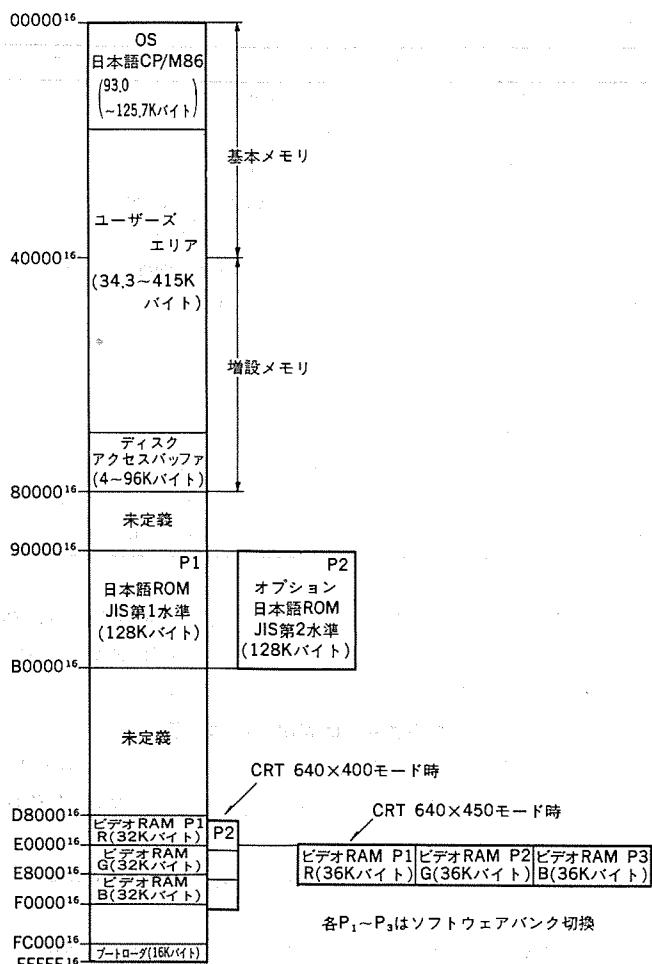


図 5. 《MULTI 16》モデルII メモリマップ

用した。

(2) CPU は i 8086-2 を中心に、22.2 MHz の発振回路とクロック分周回路からなる。プロセッサは、原発振を3分周した7.4 MHz で動作し、また同時に5分周してPCバスエミュレート用のクロック4.44 MHz を出力している。

### 5.3 メモリ

(1) 主メモリは64KビットダイナミックRAMを使用し、バスサイクル0.54  $\mu$ sを確保するため、アクセスタイム150 nsの高速タイプを使用している。  
 (2) メモリリフレッシュは、DMAコントローラによるリフレッシュ方式を採用せず、専用の回路を用い、バスの効率低下及びI/Oで使用するDMAチャンネル数の減少を防いでいる。図5. IC メモリレイアウトを示す。

### 5.4 CRT制御

制御方式は、ビットマップ方式を採用し《MULTI 16》と上位互換となっている。以下に《MULTI 16-II》で追加された機能を示す。

(1) 画面表示用のメモリが従来1画面分であったが《MULTI 16-II》では、カラー、モノクロ両モデルとも2画面分備えており、マルチタスクOSの機能を十分発揮することができる。

(2) カラーモデルの場合、マルチプレーンライト及びビットマスク機能が追加され、RGB(赤、緑、青)の各プレーン(表示メモリ)へ、それぞれ異なったデータを書き込むことができ、画面処理速度が大幅に向上した。

(3) CPUからのアクセスはサイクルスチール方式をとり、いつでも画面編集が可能となっている。また表示メモリが、主メモリから完全に

独立したため、CPUの処理速度低下がなくなった。

### 5.5 RS-232Cインターフェース

(1) 通信速度は、50~9,600 b/s(ビット/秒)までソフトウェアにより切換可能、また調歩同期、独立同期の両方式とも使用可としている。  
 (2) 割込み制御回路への割込み要求ラインとして、他I/Oと共に割込み要求ラインのほか、本体内蔵のRS-232Cインターフェース専用の割込み要求ラインをもつことにより、通信制御ソフトウェアの処理効率を大幅に高めている。

### 5.6 セントロニクスインターフェース

オプションのプリンタ、XYプロッタのほか、当社製のロボット《ムーブマスター》など、セントロニクスインターフェースをもつ機器を制御することができる。

コンカレントCP/MなどのマルチタスクOS用のため、インターフェースのレディラインから、割込み制御回路へ割込みをかける回路をもち、プリント動作と並行して他の処理を行えるようにしている。

### 5.7 キーボード制御

専用のマイクロプロセッサM5L8041Aにより、キーボード上のキーマトリクスをスキャンし、キーが押されるとチャタリング防止のためのプログラム処理を経た後、CPUへ割込み信号を送る。CPUは、キーボード制御部から送られてきた押下キーの位置情報を、ソフトウェアにより所定のコードへ変換する。

### 5.8 その他

バッテリバックアップ付きのカレンダー時計機構をもち、電源を切断しても、そのまま時計としての機能を保持することができる。年、月、日、時、分、秒、すべて読み取り可能となっており、ソフトウェアで使用することができる。

## 6. ソフトウェアの特長

《MULTI 16-II》は、これまでに《MULTI 16》で開発された豊富なソフトウェアを使用することができ、広範囲の業務分野でパソコン、ワープロ、端末としての役目を果すことができる。

### 6.1 広がるOSの世界

《MULTI 16-II》のOSとしては、日本語CP/M-86に加えてMS-DOSとコンカレントCP/M-86が提供される。

#### (1) 日本語処理のできる日本語CP/M-86

日本語CP/M-86は、デジタルリサーチ社のCP/M-86に本格的な日本語処理機能と汎用性ある日本語入力機能を加えたOSである。日本語入力方式にはカナ漢字変換とローマ字漢字変換の2方式があり、ローマ字方式はキー操作が容易である。漢字変換をスピーディにするために、国語辞書、姓名辞書、住所辞書(住所コード、郵便番号)、JIS第2水準用辞書plusシリーズなどの日本語辞書類が用意されている。

日本語CP/M-86下で、BASICやFORTRANなどの高位言語により、簡単に日本語を扱うプログラムを作成できる。また、プログラミングの知識がなくても、日本語Multiplanや日本語ワープロMultiWord-JIIなどのパッケージ類を、簡単なキー操作により日本語で使用できる。

#### (2) MS-DOS

マイクロソフト社の開発したMS-DOSは、CP/M-86の思想と機能を拡張したシングルタスク用OSである。MS-DOSでは、BASCOMというコンパイラ形BASIC言語を使用でき、統合化ソフトウェアMultiToolsもある。コマンドもUnix likeのコマンドがあり、プリンタ・スプーラ機能、タイムスタンプ機能、エラー回復機能などの特長ももっている。

表 2. 《MULTI 16》用ソフトウェア一覧

パッケージ名	システム概要	パッケージ名	システム概要
商用DB検索システム	JOIS PATOLIS DIALOG NEEDS-IR・NEEDS-TS・TSR-BIGS HINET	I 3270 エミュレータⅠ I 3270 エミュレータⅡ I 3270 エミュレータⅢ I 3270 エミュレータⅣ I 3270 ファイル伝送オプション I 3270 ファイル伝送パッケージ I 3270 簡易グラフオプション I 3780 エミュレータ I 3780 リモート パッチ、ターミナルエミュレータ RJE-86 データ通信制御 BTAM-86	BSC 3276 特定回線 BSC 3275 公衆回線 SNA/SDL 3276 I 3274-52 C, I 3278-52, I 3287 I 3276/3275用ファイル伝送オプション I 3270 ファイル伝送 HOST 側パッケージ I 3270 による簡易グラフサポート I 3780 RJE エミュレータ I 3780 RJE エミュレータ
MEL-IR	JOIS PATOLIS DIALOG NEEDS-IR・NEEDS-TS・TSR-BIGS HINET	I 3780 リモート データ通信制御 BTAM-86	BSC 伝送手順
MARK III 端末エミュレータ	MARK III	M 345 エミュレータ	BPI 手順による M 345 エミュレータ
漢字TSS エミュレータ	PATOLIS NEEDS-IR	M 4374 エミュレータ	M 4378 漢字ワークステーションエミュレータ
JIPTSS 端末エミュレータ	JIP	JCA 手順	日本チェーンストア協会の JCA 手順
DEMONS エミュレータ	DEMONS		
TSS 端末エミュレータⅡ	4010 グラフィックモード		
ファイル伝送ユーティリティⅡ	I 3740 エミュレーションバイナリ伝送		

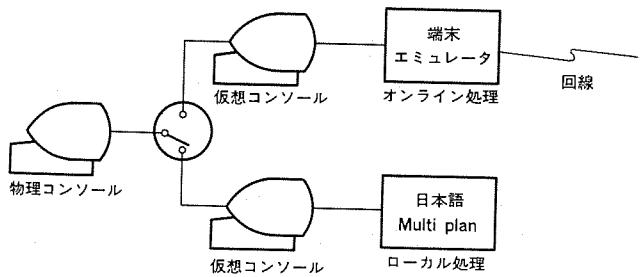


図 6. 仮想コンソール

### (3) コンカレント CP/M-86

コンカレント CP/M-86 は、デジタルリサーチ社の開発した CP/M-86 の上位 OS で、最大 4 個のタスクを同時動作させることのできるシングルユーザーマルチタスク用 OS である。

マルチタスク機能により、《MULTI 16-II》を端末としてホスト接続し、オンライン業務を処理しながら、ローカル処理として簡易言語などを使用できる。通常は、簡易言語用に指定した仮想コンソール(図 6.)を物理コンソールに映し出しておき、必要に応じてキー操作で、端末用に指定した仮想コンソールを物理コンソールに映し出して、オンライン業務の状況を確認できる。

### 6.2 業務分野を広げるソフトウェア

《MULTI 16-II》には、多方面の多様なニーズにこたえる豊富なソフトウェアが用意されている。簡易作表言語の日本語 Multiplan、ビジネスグラフを作成する Multi BG/M、集計計算用プログラムを自動的に作成する OA-1、手軽にデータ管理ができる Data Box-J などの各種パッケージが、オフィス業務の高率化に役立つ。日本語 Multiplan は、《MULTI 16》で広く知られている Multiplan の日本語版で、コマンドやメッセージが日本語化され、スクロール機能などが高速化されている。日本語 Multiplan の作成した数値データを、Multi BG/M によりグラフ表示できる。高度な事務計算用には COBOL も使用できる。

技術計算分野では、BASIC や FORTRAN などが用意されてお

り、高度な技術計算をこなすことができる。計測制御分野では、標準インターフェースとして GP-IB があり、BASIC や FORTRAN で GP-IB を使うための GP-IB ライブライも用意されている。

### 6.3 専用機並の日本語ワープロ MultiWord-J II

日本語ワープロ MultiWord-J II は、JIS キーボードに加えてワープロキーボードでも使用できるようになり、専用機並のワープロ機能と操作性が実現されている。

- (1) 入力方式には、日本語 CP/M と同様に、カナ漢字変換とローマ字漢字変換の 2 方式を採用している。
- (2) 漢字変換には熟語変換と単字変換があり、便利な学習機能もある。
- (3) 略語登録機能や外字フォント作成機能がある。
- (4) 作表、計算、ソート機能があり、数表入り文書を作成することができる。

(5) 編集機能には、挿入、削除、引用、センターリングなどがあり、文書の修正が簡単にできる。

(6) 豊富な印刷機能がある。

### 6.4 端末ソフトウェア

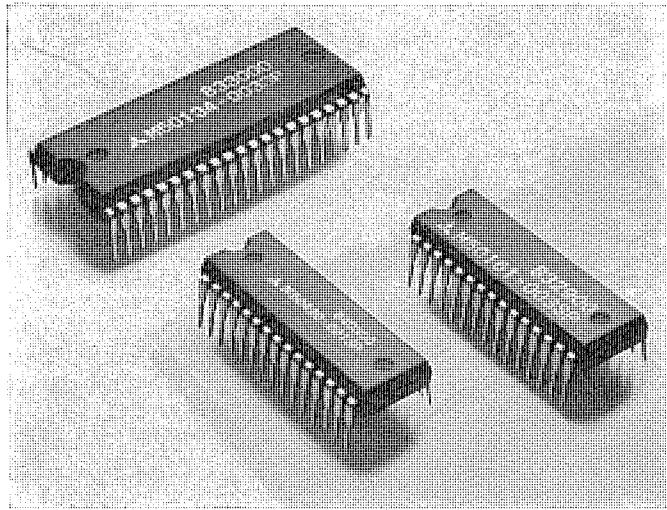
《MULTI 16-II》は、データ処理の高速化、通信回線の強化、エミュレータの強化などにより、オンライン端末としての機能、性能が強化されている。ホスト接続用として用意されているエミュレータを使うと、COSMO シリーズや IBM シリーズなどに接続して、ホストとのデータ交換やファイル伝送などができる。また、国内外のデータベースシステムに対応したエミュレータも各種用意されており、公衆回線を使用して接続することができる。

### 7. むすび

16ビットパソコンの世界を先取りした《MULTI 16》に引き続き、その豊富な実績をもとに開発された高速多機能パソコン《MULTI 16-II》は、今後ますます多様化するユーザーの期待に十分こたえるものと確信する。

# スポットライト

## TV/VTR用 三菱V/S専用・F/S専用マイコンシリーズ



このたび三菱電機では、コストパフォーマンスの高いシンセサイザマイコンへの市場ニーズにお応えして、V/S(電圧シンセサイザ)専用マイコンシリーズとF/S(周波数シンセサイザ)専用マイコンシリーズの大幅な拡充を図りました。TV、VTRのチューニングシステムは、ロータリー式などの機械式やチャンネル数だけポテンショメータを並べて、これをICで切換える電子式から高機能化、高信頼性、小形化を指向したシンセサイザ方式へ変ろうとしています。

三菱電機ではランダム回路で構成したV/S専用LSIを昭和57年に開発。以後、シリーズ化を進めてきました。

このたびのシリーズ拡充により、低級機から高級機のTV、VTRに至るまで要求される機能に適したV/S、F/Sマイコンを選択していただけるようになりました。

### 特長

#### ●M50161-XXXXSP

リモコン受信回路、チューニング電圧発生用D/Aコンバータ、アナログ量制御用D/Aコンバータ、電圧コンパレータを内蔵したV/Sマイコンで、中級機のチューニングシステムに最適です。

#### ●M50430-XXXXSP

チューニング電圧発生用D/Aコンバータ、8ポートのLED直接駆動回路を内蔵したV/Sマイコンです。ポテンショメータ方式と価格的にも競合でき、低級機のチューニングシステムに最適です。

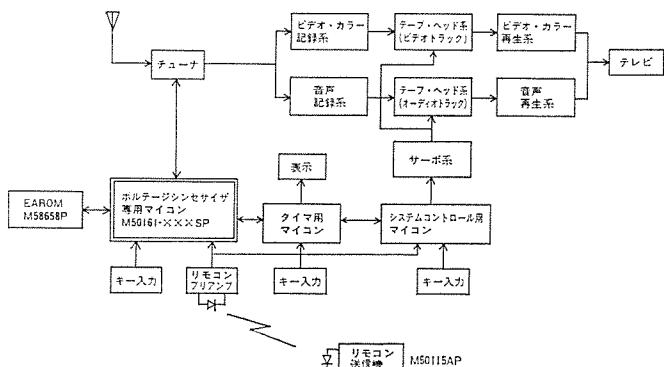
#### ●M50431-XXXXSP

リモコン受信回路、チューニング電圧発生用D/Aコンバータ、3本のアナログ量制御用D/Aコンバータ、8ポートのLED直接駆動回路、映像信号検出回路を内蔵したV/Sマイコンで、中・高級機のチューニングシステムに最適です。

#### ●M50134-XXXXSP

リモコン受信回路、4本のアナログ量制御用D/Aコンバータ、タイマ、電圧コンパレータ、映像信号検出回路を内蔵したF/Sマイコンです。PLL IC (M54955Pなど)と組み合わせてシンセサイザシステムを構成、中・高級機のチューニングシステムに最適です。

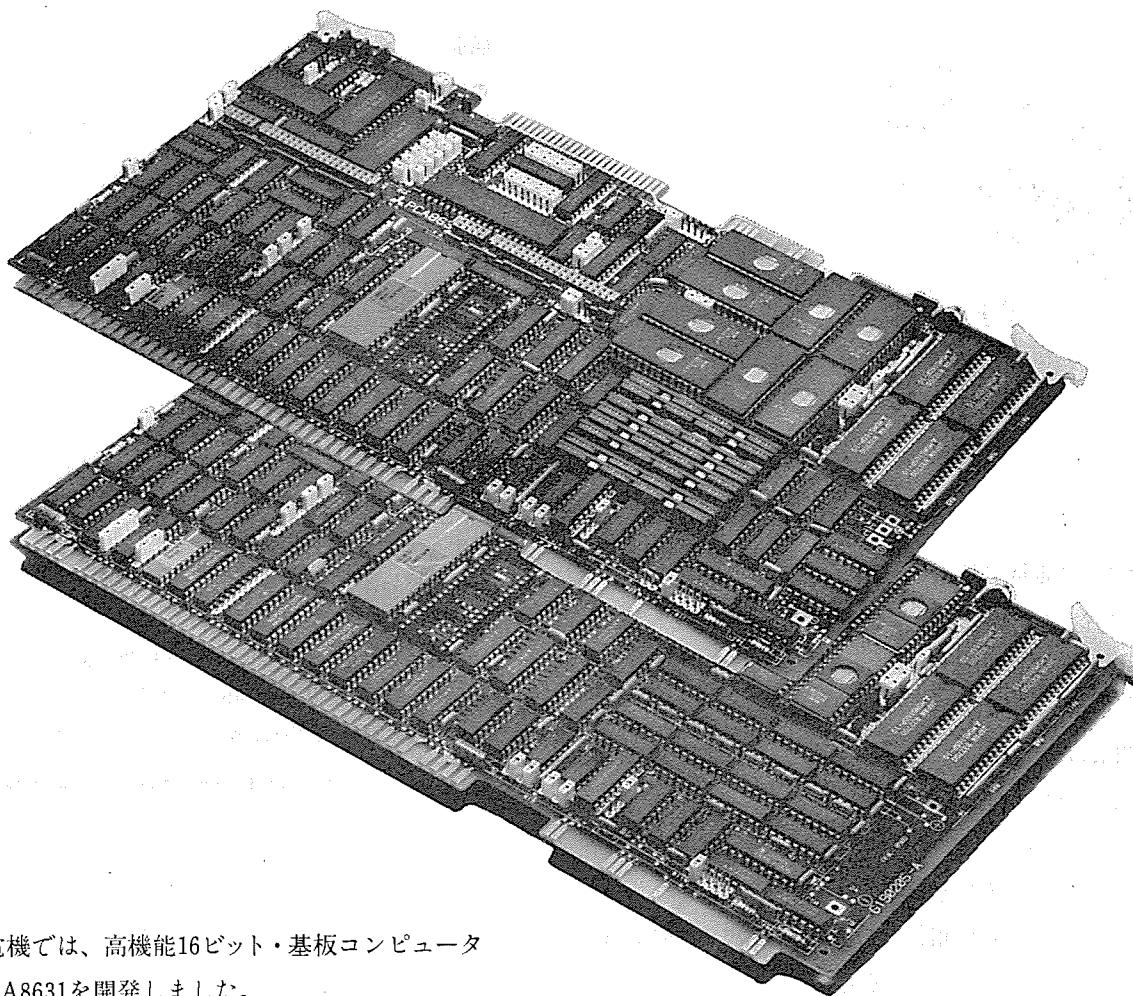
### ■M50161-XXXXSPを用いたVTR用チューニングシステム



### シンセサイザ専用 C-MOSマイコン一覧表

方式	形名	外形	ROM	RAM	スタック	電圧比較器	アナログ出力	ポート	特長
電圧シンセサイザ	M50161-XXXXSP	30ピン シールドダブル DIL	1K語 ×18bit	64語 ×4bit	4レベル	2	1	1ビット入出力×5 4ビット入出力×1 4ビット出力×2 2ビット入力×1	(1)チューニング電圧制御用 14ビットD/Aコンバータ内蔵 (2)1-ボリューム方式、 またはオートプリセット
	M50430-XXXXSP	30ピン シールドダブル DIL	-1.2K語 ×8bit	32語 ×4bit	2レベル	—	—	1ビット入出力×2 4ビット出力×2 2ビット出力×1 1ビット出力×7 4ビット出力×1	(1)チューニング電圧制御用 14ビットD/Aコンバータ内蔵 (2)LED表示用セグメント出力
	M50431-XXXXSP	42ピン シールドダブル DIL	3K語 ×8bit	96語 ×4bit	5レベル	—	3	4ビット入出力×1 1ビット入出力×1 8ビット出力×1 4ビット出力×2 2ビット出力×1 4ビット入力×1	(1)チューニング電圧制御用 14ビットD/Aコンバータ内蔵 (2)フルオートプリセットに最適
周波数シンセサイザ	M50134-XXXXSP	42ピン シールドダブル DIL	1.5K語 ×18bit	96語 ×4bit	4レベル	2	4	1ビット入出力×4 4ビット出力×3 4ビット入力×2	(1)250msタイマ内蔵 (タイマ、計時が可能) (2)4MHz クロック出力
	M50151-XXXXSP	40ピン シールドダブル DIL	1K語 ×18bit	96語 ×4bit	3レベル	2	1	1ビット入出力×1 4ビット出力×4 4ビット入力×2	(1)4MHz クロック出力
	M50154-XXXXSP	42ピン シールドダブル DIL	1.5K語 ×18bit	96語 ×4bit	4レベル	2	1	1ビット入出力×1 4ビット出力×4 4ビット入力×2	(1)4MHz クロック出力

PCA8631



このたび三菱電機では、高機能16ビット・基板コンピュータPCA8630、PCA8631を開発しました。

これによって、16ビット標準CPUボードPCA86××シリーズは一段と充実しました。ボード上には、256Kバイト (PCA8630の場合は、128Kバイト) のDRAMを実装、ROMは最大256Kバイト、CMOS RAMは最大32Kバイト実装可能です。I/Oとして、シリアルポート、24ビットのパラレルポート、3個の16ビットタイマ及び割込みコントローラを持ち、I/O拡張用のSBXバスもサポートしています。また、I/Oは、PCA8601 (CPUボード) と同じマッピングにしており、ソフトウェアの互換性を持たせてあります。

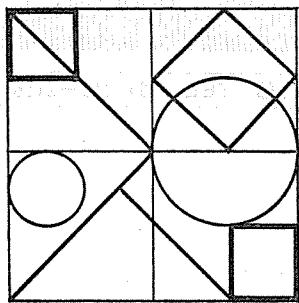
このPCA8630・8631は、パーソナルコンピュータから計測・制御システムの設計まで、8086を使用したシステムの幅広い応用に利用できます。また、他のPCA86××シリーズと組合せてハードウェアの設計省力化、高機能化が可能。PCA9100 (クロスアセンブルマシン)、PC9111 (デバッガ) などの開発サポート装置を使用してソフトウェアの開発に専念でき、システム開発の省力化にお役立ていただけます。

### 特長

- CPUには、M5L8086S-2 (クロック: 8MHzまたは5MHz) を搭載しました。
- EPROMは、最大256Kバイト実装でき、2732・27128・27256に対応します。(28ピンICソケット8個実装)
- DRAMは、256Kバイト (PCA8630は128Kバイト) 実装、ノーウエストでのアクセスが可能です。(リフレッシュ時は除く) なお、このメモリはシステムバスからもアクセスできるデュアルポートRAMです。
- SRAMは、28ピンICソケットを4個実装、最大32Kバイト (M5M5156P実装時) のCMOS RAMの実装が可能。バッテリバックアップ機能ももっており、バッテリの実装も可能です。(PCA8630のみ)
- I/Oは、シリアルI/O (M5L8251AP)、24ビットのパラレルI/O (M5L8255AP-5)、16ビット×3のタイマ (M5L8253P-5) および8レベルの割込みコントローラ (M5L8259AP) を実装。I/O拡張用のSBXバスもサポートしています。
- システムバスは、IEEE-796バスを採用しており、16Mバイトのメモリ空間をアクセスできます。

# 特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 特許部 TEL (03) 218-2136



## 放射線測定装置 (特許 第1003745号)

発明者 小田稔

この発明は放射線を用いたレベル計に関するものであり、特に被測定物のレベルに対する出力の直線性の改良を目的としている。

図1.は、従来のこの種のレベル計の一例を示すものであり、(1)は被測定物、(2)はその表面、(3)は容器、(4)は放射線源、(5)は放射線検出器、(7)は加算装置を示す。従来のこの種のレベル計は、図1.の様に単に放射線源と検出器をそれぞれ複数個対向配置しただけであるため、その出力はレベル変化に対して図2.の様に波を打つ欠点があった。この原因の一つは、被測定物の表面による散乱放射線が、検出器出力を不必要に増大させることにある。すなわち、被測定物のレベルが上昇して、ある検出器(または放射線源)のレベルを通過する時、検出器の直下では散乱放射線のために検出器の出力が一旦上昇し、その後被測定物によって放射線が遮断され、出力は急激に減少する。

図3.はこの発明の一実施例の構成を示すが、

(1) 放射線ビームの方向がコリメータによって制限されているため、散乱放射線が発生しない。

(2) 放射線源を容器壁面か

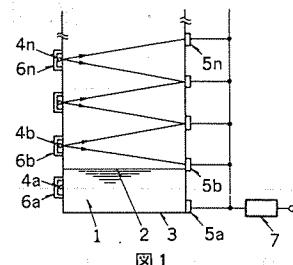


図1.

ら特定の距離だけ(この実施例では線源、検出器間隔の1/5)はなすことによって、線源と検出器を結ぶ直線が容器と交わる点が等間隔に多数得られるため、出力の直線性が著しく改善される。

この実施例では、以上2つの効果により出力直線性が従来のレベル計に比べて約1桁改善される。

この発明には多くの応用変形が考えられるが、いずれの変形においても線源と検出器を結ぶすべての直線を一方向(上向きまたは下向き)に傾斜させ、これ等の直線と容器壁面との交点のうち下方にあるものを、ほぼ等間隔に配置する事を特徴としている。

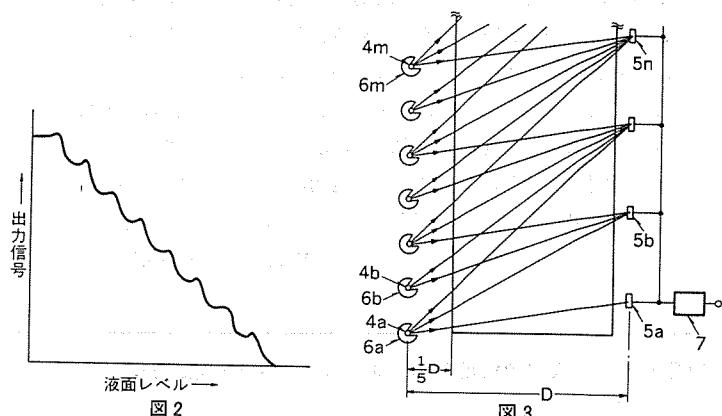


図2.

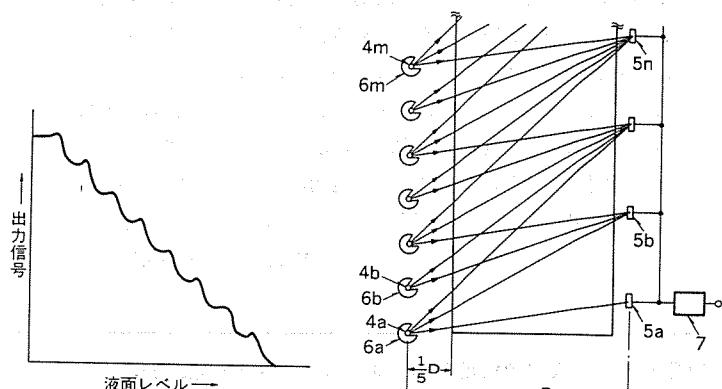


図3.

## X線発生装置用ターゲット装置 (実用新案 第1197784号)

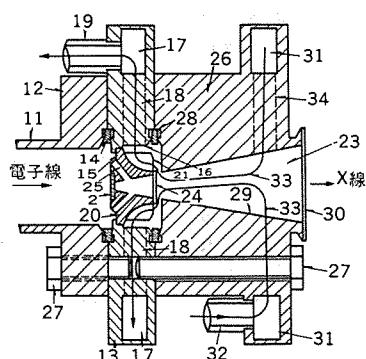
考案者 入江浩一・美濃和芳文

この考案は高エネルギーの電子線をX線に変換する水冷式のX線発生装置用ターゲット装置に関するもので、そのターゲット自体の長寿命化を図るようにしたるものである。

通常のX線発生装置は高エネルギーの電子を重金属(例えば金、白金、タンクステン等)の板に衝突させてX線を得ているが、この衝突点で電子ビームのエネルギーの大部分は重金属の板(これをターゲットとい)の内部で熱となる。したがって、このターゲットは非常に高温となるので、ターゲットの溶融が生じないよう効果的な冷却が必要となる。

この考案は、外周部に冷却水で冷却されるフィン(21)を有し、中心部にテーパ状の貫通孔(23)を有するターゲット座(20)にターゲット(2)を取り付け、このターゲット(2)を冷却水で間接的に冷却するようにしたもので、これによりターゲット(2)の破損による真空ダクト(11)内への冷却水の侵入が防止され、またターゲット(2)は冷却水に直接触

れないで、水の分解物や不純物とターゲット物質との化学反応による変質、熱歪によるわれが防止でき、ターゲット自体の寿命を長くすることが可能となる。



# 特許と新案 有償開放

有償開放についてのお問合せ先 三菱電機株式会社 特許部 TEL (03) 218-2136

## 中性子検出装置 (特許 第 845107 号)

発明者 小田 稔

この発明は、中性子及びガム線を発生する試料から、中性子だけを測定する装置の改良に関するものである。この装置の代表的な応用例としては、遅発中性子による原子炉の破損燃料検出装置があげられる。

図1., 図2. は、この発明の装置の一例を示す。図において、(1)は試料、(2)は鉛遮蔽体、(3)は中性子検出器、(4)は中性子減速材である。鉛遮蔽体(2)は、適当な距離だけ離れて置かれた試料(1)と検出器(3)との間にあって、試料(1)と検出器(3)との間を見透し不可能にする最小限の断面積を持ち、距離方向には最大限の有効長を持たせる。このようにすると、中性子減速材(4)と試料(1)とが接近するため中性子検出効率が高くなり、ガム線の遮蔽に関しては、従来の装置のように試料のまわりを一様にとり囲んだ場合よりもビルトアップファクタが小さくなるので、距離当りの遮蔽能力がかえって大きくなる。ビルトアップファクタが小さくなる理由は減速材に用いられる物質の密度が、通常、鉛の密度より小さいことによる。

以上の説明で明らかなように、この発明によれば中性子検出効率が高く、ガム線遮蔽能力の良好な装置が得られ、また大量の鉛の節約による装置の軽量化、それによる装置の構造の簡単化が可能であ

り、技術的にも経済的にも大きな利益を生ずる。

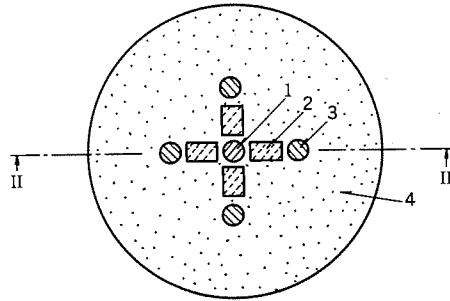


図1

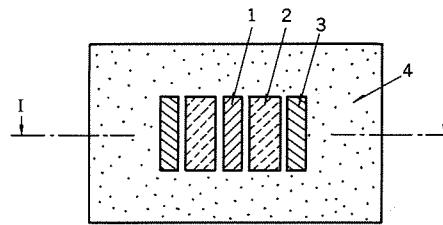


図2

〈次号予定〉 三菱電機技報 Vol. 58 No. 5 冷凍・空調特集

### 特集論文

- 冷凍サイクルの広域高効率制御方式
- マルチ・スプリット形エアコンディショナー
- クリーンルーム用パッケージエアコン PFC 形
- 冷暖房給湯ヒートポンプ “コンビネーション Q”
- ガスエンジン駆動ヒートポンプ
- 新冷媒流量制御の空気熱源ヒートポンプチラー
- 冷蔵倉庫管理システム
- 超低温ブラインクーラー BCU 形

### ● 高 SEER 形新冷凍サイクル 『MICLOSS』 とその実用例

- チルド室付 4 ドア冷凍冷蔵庫
- スクロール圧縮機

### 普通論文

- 航空機産業向 CNC 電子ビーム溶接機
- レーダ雨量計システム
- アクティブマスダンバ式振動制御装置
- 『MELCOM 80 オフィスランド』 モデル 500・400 の入出力システム

### 三菱電機技報編集委員

委員長	馬場 準一	委員	山内 敦
副委員長	岸本 駿二	"	柳下 昌平
"	三浦 宏	"	櫻井 浩
委員	峯松 雅登	"	徳山 長
"	翠川 祐	"	柴山 恭一
"	佐藤文彦	"	酒井 靖夫
"	大年 倉像	"	武富 大児
"	井上 通	"	瀬辺 国昭
"	立川 清兵衛	"	倉橋 浩一郎
"	吉田 太郎	"	小原 英一
"	野畑 昭夫	"	尾形 善弘
"	田中 克介	幹事	岡田 俊介
"	的場 健	4号特集担当	森川 鐘也
"	野村 兼八郎		安野 亨

### 三菱電機技報 58 卷 4 号

(無断転載を禁ず) 昭和 59 年 4 月 22 日 印刷  
昭和 59 年 4 月 25 日 発行

編集兼発行人 岡田 俊介  
印刷所 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地  
大日本印刷株式会社  
発行所 東京都千代田区大手町 2 丁目 6 番 2 号 (〒 100)  
三菱エンジニアリング株式会社内  
「三菱電機技報社」 Tel. (03) 243 局 1767  
発売元 東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (〒 101)  
株式会社 オーム社  
Tel. (03) 233 局 0641 (代), 振替口座東京 6-20018  
定価 1 部 500 円送料別 (年間予約は送料共 6,700 円)

スポット  
ライト

# 氷温チルドルームつき 三菱チルド・4ドア冷蔵庫



このたび三菱電機では、業界初の画期的なく氷温チルドルームのついた冷蔵庫《チルド・4ドアROTARYみどり》を新発売しました。

最近の消費者調査でも「食品を凍らせずに低温で保存すること」へのニーズが高まっており、こうした消費者の声にいち早く応えたのが、この冷蔵庫といえます。これは、冷蔵庫の新次元をひらくもので、氷温（約0°C）という新しい温度を自動的に保つ食品保存室（チルドルーム）を備えたユニークなもの。今までの冷蔵庫の限界を超えた優れた保存性で、私たちにより上手に「食」を楽しむ時代を開いてくれることでしょう。

## 特長

### ●チルドルーム

- ①チルドルームの温度は、食品が凍る寸前の約0°Cになっているため、食品の鮮度・風味をそのまま保存できます。
- ②酵素や乳酸菌の働きを0°Cでおさえることができるので、いつも「食べごろ」の状態で保存できます。
- ③解凍の手間がないので、必要な分だけ小出しに使えます。
- ④チルドルーム専用のダンパーサーモで温度制御。扉が開閉しても自動的に風量を調節し、温度を約0°Cに保ちます。冷気の流出を抑えるため、引出し式を採用しました。
- ⑤51lの大容量。左右ふたつに別れたケースをセパレータで更にふたつに仕切り、大きなものから小さなビン詰め食品までスッキリ収まるようになっています。
- ⑥ケースがはずせる構造なので丸ごと洗いも可能です。
- ⑦人間工学から生まれたポジション（冷蔵室の下）により、使い易くなっています。

### ●野菜室

- ①ロータリーコンパクトに収納、庫内の有効利用を図り、70lの大容量を実現。大きく長い野菜でもいためず収まります。
- ②小さな野菜、フルーツを分けておく小物ケースは奥までスライドするので出し入れが簡単です。
- ③冷蔵室としても使える切替えシャッターフタつきです。
- ④広い開口部で、出し入れのラクな引出し式。はずせるので丸ごと洗いもできます。日ごろのお掃除はケース底面のトレイをはずすだけ可能です。

### ●冷蔵室

- ①扉には上から下へ、フリーポケット、オープンポケット、セットフリーポケット、ボトルポケット…など、食品の形に応じた棚が、取り出し易い設計で整っています。
- ②庫内には3段階に広さが変えられる棚を備けました。

### ●冷凍室

- ①他の食品に影響を与えずにフリージングできる（フリーズルーム）を採用しました。
- ②大小2種類の氷が一度につくれる製氷皿、そのまま食卓に出せる貯氷箱を備えました。
- ③タテ長のアイスクリームも入るように、広さが3段階に変えられる棚を採用。ドアスペースには、食品サイズに応じて変化する（セットフリーポケット）を採用しました。

### 仕様

形名	MR-3054CW MR-3054CLW(左開き)	MR-3054CS MR-3054CLS(左開き)	MR-3054CC MR-3054CLC(左開き)
キャビネットカラー	クリスタルホワイト(W)	シルキーブラウン(S)	サンベニルージュ(C)
電源	AC100V 50/60Hz	95/105W	
電動機定格消費電力(50/60Hz)			
有効内容積	305l(冷凍室60l、冷蔵室245l(内チルド室51l、野菜室70l))		
外形寸法	635mm(幅)×1,820mm(高さ)×595mm(奥行)		
製品重量	75kg		
年平均電力量(50/60Hz)		27/27kW	